

## Modularisering i byggeriet: Fra en systemleverance og Mass Customization tilgang

Kudsk, Anders; Thuesen, Christian; Hvam, Lars

*Publication date:*  
2012

*Document Version*  
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

*Citation (APA):*  
Kudsk, A., Thuesen, C., & Hvam, L. (2012). Modularisering i byggeriet: Fra en systemleverance og Mass Customization tilgang. Kgs. Lyngby: Technical University of Denmark (DTU).

### DTU Library

Technical Information Center of Denmark

---

#### General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

# Modularisering i byggeriet

Fra en systemleverance og Mass Customization tilgang



**PhD afhandling**

**Anders Kudsk**

**Juni 2013**

**NCC Construction Danmark A/S**

# DTU Management Engineering

Modularisering i byggeriet

Fra en systemleverance og Mass Customization tilgang

Erhvervs Ph.D. afhandling

Anders Kudsk

2013

ISBN 978-87-92706-92-8

Forside billede: VILHELM LAURITZEN ARKITEKTER Udkast til kommende domicil for NCC Construction Danmark A/S, baseret på delvis modularisering.

DTU Management Engineering

Operations Management, Production and Service

Produktionstorvet

Bygning 424

2800 Kgs. Lyngby

NCC Construction Danmark A/S

Østmarken 3B

2860 Søborg

Tryk:

# Forord

Nærværende afhandling er resultatet af et treårigt Erhvervs Ph.D. projekt udført på institut for Management Engineering, Danmarks Tekniske Universitet, i NCC Construction Danmark A/S og med et tre måneders gæsteophold på Loughborough University, England. Gennem projektet har jeg fået støtte fra en lang række personer og organisationer, som jeg skylder stor tak. I denne forbindelse vil jeg særligt takke følgende:

- Sysbyg netværket, for at have været en væsentlig del af baggrunden for dette arbejde og bidraget væsentlige i forhold til den arkitektoniske tilgang.
- Civil Ingeniør Sven Bertelsen, for inspirerende samtaler om byggeriets udvikling gennem tiden.
- Professor Simon Austin for at modtage mig på Loughborough University og for at komme med væsentlige bidrag til de anvendte videnskabelige metoder.
- Fonden Realdania, NCC og den danske stat for at finansierer projektet.
- De mange kollegaer i NCC, som har bidraget med moralsk støtte og central byggefaglig viden.
- De studerende, som jeg har haft fornøjelsen af at vejlede, og som har vist stor interesse i at bidrage til løse byggeriets udfordringer.
- Min tidligere kollega Svend-Erik Hansen, for løbende sparring og for kommentering af manuskriptet.
- Mine fire vejledere Lars Hvam, Christian Langhoff Thuesen, Gert Jespersen og Svend Mertz for at forene kræfterne og samle forskellige faglige baggrunde i dette projekt.

Herudover vil jeg gerne takke min familie og venner for at have holdt mig ud også i perioder, hvor jeg har givet dem alt for lidt fokus. Til sidst vil jeg gerne takke dem, som jeg måtte have glemt eller som der ikke blev plads til at nævne her, men som har bidraget til dette projekts gennemførelse.

Kgs. Lyngby, juni 2013,

Anders Kudsk



# Abstract

The use of configurable system deliveries, based on the principles of Mass Customization, is described by many as a solution to the challenges of construction, which is characterized by low earnings, lack of development in productivity and poor quality. Technical University of Denmark (DTU), School of Architecture Aarhus (aarch) and Centre for Industrial Architecture CINARK at the Royal Danish Art Academy's School of Architecture, Design and Conservation (hereafter referred to as School of Architecture) are playing a central role in establishing a vision regarding the use of system deliveries in construction. These institutions have produced a series of publications describing the possibilities presented by the transfer to construction of Mass Customization, product platforms and the use of configuration systems, theories and methods developed in the production industry.

With this point of departure, this project has carried out work that, with an engineering focus and research approach, investigates the possibilities for realizing this vision. The work focuses on some selected areas within the following overall research question:

*How, in a Danish context, can Mass Customization and the theories on which it is based realize the vision of industrialized architecture through the use of system deliveries?*

An important element in Mass Customization, the establishment and use of product families, is modularization. Modules in construction lead most of us to think about the period with module and montage construction, when much construction was industrialized, but in order to build many large units of very standardized construction, a type of building for which a market no longer exists in Denmark. To expand understanding of modules in construction, a study was conducted of historical construction built according to the "Building Law for the Capital City of Copenhagen and its Suburbs". The study found that historical buildings, when studied using modern methods, could be described as comprising modules with standardized interfaces.

Buildings are very large products sold in a limited number of units as small as a single unit. At the same time, building construction is carried out by enterprises of limited size and capacity for development. This means that most enterprises, by far, must work with step-wise implementation of modules. Possibilities for implementing modules step-wise are described in several studies that work with a top-down approach that is based on the whole building, and a bottom-up approach that focuses on specific parts.

Step-wise implementation also leads to partial modularization, something that Mass Customization, on which it is based, and modularization theory only focus on to a limited extent. In order to create a framework for understanding partial modularization, this work presents The Module Application Matrix, which makes it possible to map completely or partially modularized products with completely or partially detailed modules.

Another central element in Mass Customization theory and in the vision is the use of configuration systems. Here, three different prototype configuration systems are presented to illuminate the possibilities for using configuration systems in construction – also including the possibilities and challenges that lie in configuring partially modularized and partially described products and products with infinite potential solutions.



# Resumé

Anvendelse af konfigurerbare systemleverancer, baseret på principperne om Mass Customization, er fra flere sider beskrevet som en løsning på byggeriets udfordringer med lav indtjening, manglende produktivitetsudvikling og svigtende kvalitet. Danmarks Tekniske Universitet (DTU), Arkitektskolen Aarhus (aarch) og Center for Industriel Arkitektur CINARK på Det Kongelige Danske Kunstakademis Skoler for Arkitektur, Design og Konservering – Arkitektskolen – har en central rolle i etableringen af en vision om anvendelse af systemleverancer i byggeriet. Herfra er der udgivet en række publikationer, der beskriver hvilke muligheder, der ligger i at overføre Mass Customization, produktplatforme og brug af konfigureringsystemer, -teorier og -metoder, der er udviklet i produktionsindustrien, til byggerier.

Med dette som udgangspunkt er der i dette projekt gennemført en række arbejder, der med en ingeniørmæssig fokus og forskningsmæssig tilgang, undersøger mulighederne for at realisere visionen. Arbejderne fokuserer på en række udvalgte områder inden for det overordnede forskningsspørgsmål:

”Hvordan kan Mass Customization og de underliggende teorier, i en dansk kontekst, realisere visionen om industrialiseret arkitektur, med anvendelse af systemleverancer?”

Et vigtigt element i Mass Customization og etablering og anvendelse af produkt familier er modularisering. Moduler i byggeri leder de flestes tanker hen på perioden med modul- og montagebyggeri. En periode, hvor der skete en stor industrialisering af byggeriet, men hvor der også blev opført meget store enheder af meget standardiseret byggeri, en byggeritype, der ikke længere er et marked for i Danmark. For at udvide forståelsen af moduler i byggeri er der gennemført en undersøgelse af historisk byggeri efter, Bygningslov for Staden København og dens Forstæder. Her viser det sig, at det historiske byggeri med moderne metoder kan beskrives som bestående af moduler med standardiserede grænseflader. Og at disse grænseflader ikke bare er gældende imellem de fysiske moduler, men går igen i forhold til både organisering, materialer og processer.

Byggerier er meget store produkter, der sælges i et begrænset styktal, helt ned til ét styk. Samtidig udføres byggerierne af virksomheder med en begrænset størrelse og udviklingskapacitet. Dette betyder, at langt de fleste virksomheder må arbejde med en trinvis implementering af moduler. Mulighederne for at implementere moduler trinvist er beskrevet i en række arbejder, hvor der arbejdes med henholdsvis en top-down tilgang med udgangspunkt i hele bygningen, og en bottom-up tilgang, hvor der fokuseres på enkeltdele.

Den trinvis implementering foranlediger også en delvis modularisering, noget som den bagvedliggende Mass Customization og modulariseringsteori kun fokuserer meget begrænset på. For at skabe en forståelsesramme omkring delvis modularisering er der i dette arbejde skabt ”The Module Application Matrix”, der giver mulighed for at mappe helt eller delvist modulariserede produkter med helt eller delvist detaljerede moduler.

Et andet centralt element i Mass Customization teorien og i visionen er brugen af konfigureringsystemer. Der er her etableret tre forskellige prototype konfigurationssystemer, der skal belyse mulighederne for at anvende konfigureringsystemer i byggeriet – herunder også de muligheder og udfordringer, der ligger i at konfigurere delvist modulariserede og delvist beskrevne produkter og produkter med uendeligt løsningsrum.





# Indhold

Del 1 Introduktion til forskningsområdet .....	7
1.1.    Indledning .....	7
1.2.    Baggrunden for projektet .....	7
1.3.    Vision .....	8
1.4.    Industrialisering vs. nyindustrialisering .....	8
1.5.    Modulbyggeri gennem tiden - anvendelse og visioner .....	9
Del 2 Videnskabelig tilgang .....	11
2.1.    Forskningstradition på DTU .....	11
2.2.    Forskningstradition på CINARK .....	11
2.3.    Videnskabelig tilgang i dette projekt .....	11
2.4.    Brug af materiale fra CINARK mfl. ....	13
2.5.    Vurdering af forskningsresultaternes pålidelighed .....	13
Del 3 Identifikation af forskningsspørgsmål .....	15
3.1.    Problemformulering .....	18
3.2.    Afgrensninger og fokus .....	18
3.3.    Forskningsdesign og gennemførelse .....	19
Del 4 Metoder og teorier .....	21
4.1.    Mass Customization .....	21
4.2.    Produkter .....	22
4.3.    Produktfamilier .....	23
4.4.    Produkt Variant Master .....	23
4.5.    Moduler .....	24
4.6.    Systemer og kompleksitet .....	25
4.7.    Modular Function Deployment .....	26
4.8.    Én-til-én .....	27
4.9.    Konfigureringsystemer .....	27
4.10.   Opsummering på teorien og metoder .....	29
Del 5 Forskningsmæssige bidrag .....	31
5.1.    Hvorledes er moduler tidligere blevet anvendt i byggeriet? .....	31
5.2.    Hvad er forskellen på, hvordan moduler indgår i produkter i produktionsindustrien og i en entreprenørvirksomhed? .....	40
5.3.    Hvilke metoder kan anvendes til at implementere moduler trinvist i en entreprenørvirksomhed? .....	44
5.4.    Hvordan kan konfigureringsystemer anvendes i en entreprenørvirksomhed (til implementering af moduler og produktarkitektur)? .....	55
Del 6 Konklusion .....	85
Del 7 Perspektivering og fremtidig F&U .....	87
Kilder .....	89
Appendiks 1 Modules in historic building construction according to the Copenhagen Building Code .....	93
Appendiks 2 Expanding the field of modularization whit the introduction of the module application matrix .....	103
Appendiks 3 Modularization in the Construction Industry through a Top-Down Approach .....	113
Appendiks 4 Stepwise Modularization in the Construction Industry through a Bottom-Up Approach .....	127
Appendiks 5 Supporting Design Processes by Means of Configuration .....	137



## Introduktion til forskningsområdet

### 1.1. Indledning

Den primære baggrund for dette arbejde er de visioner og erfaringer, der er gjort på Center for Industriel Arkitektur CINARK, på Det Kongelige Danske Kunstakademis Skoler for Arkitektur, Design og Konservering – Arkitektskolen, på DTU Management Engineering og i NCC Construction Danmark A/S (NCC). Arbejdet er udført, som en del af det Realdania støttede SYSBYG forskningsnetværk, der også inddrager Arkitektskolen Aarhus. Dette arbejde er udført som et Erhvervs-Ph.D. projekt på henholdsvis Danmarks Tekniske Universitet (DTU), Management Engineering, Institut for Operation Management, og i NCC.

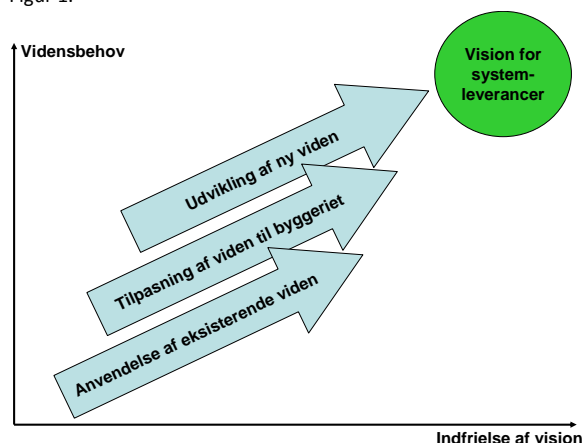
Min egen erhvervs- og uddannelsesmæssige baggrund er centreret om byggebranchen, med uddannelse som først Diplom- og efterfølgende Civil Ingeniør fra BYG-DTU og en forudgående håndværksmæssig baggrund som faglært Bygningsstøttemester. Selv om jeg erhvervsmæssigt har arbejdet med NCC's konceptbyggeri og med forundersøgelser i forbindelse med udvikling af en konfigurator til NCC's præfabrikerede skakt, har den byggefaglige baggrund gjort, at der igennem projektet har skullet læres en række nye metoder og tanke-sæt fra produktionsindustrien – dette udover den forskningsmæssige uddannelse, der er en naturlig del af ethvert Ph.D. projekt.

### 1.2. Baggrunden for projektet

Baggrunden for dette projekt er en række bøger, artikler, papers og rapporter skrevet over de sidste ca. 8 år, hovedsageligt på CINARK, Center for Industriel Arkitektur, nogle af dem i samarbejde med DTU, andre på Arkitektskolen Aarhus og andre uddannelses- og forskningsinstitutioner. Denne litteratur har hovedfokus på den betydning, som industrialisering har og vil have på arkitektens rolle og på arkitekturen, men den indeholder også en række beskrivelser og forslag til, hvad der kan gøres for at industrialisere byggeriet. På trods af litteraturens forholdsvis snævre fokus på arkitektur og arkitektens rolle er litteraturen også relevant, når man ser på en større del af byggeriets processer og aktører. Dette skyldes, at arkitekten traditionelt har styret de tidlige faser og dermed også haft stor indflydelse på de senere, herunder de udførende faser.

Selv om litteraturen fokuserer forskelligt og peger i lidt forskellige retninger, er disse bidrag blevet samlet, udvalgt og kombineret med input fra dialoger med en række personer i branchen samt med mine egne erfaringer. Derved er der skabt, hvad der kan betegnes som en vision for, hvordan byggeriet kan udnytte industrialisering, systemleverancer, modularisering og Mass Customization. Denne vision adskiller sig lidt fra traditionelle visioner, ved også at rejse en række spørgsmål/ efterspørge løsninger. Derved bliver en del af visionen et ønske om at disse spørgsmål kan besvares. Visionen er efterfølgende blevet brugt til at opstille de hypoteser og forskningsspørgsmål, der er blevet arbejdet med i dette projekt. Derved følges principperne i den metode, der anvises i "Forskningsopgaver i systemleverancer" [Hvam & Mortensen, 2007], se

Figur 1.



Figur 1 Viden behov i forbindelse med realisering af systemleverance visionen [Hvam & Mortensen, 2007]

### 1.3. Vision

I dette afsnit vil den vision, som dette projekt ønsker at bidrage til at realisere blive gennemgået. Visionen er specifikt skabt, som en del af dette projekt, men baserer sig på en lang række kilder og bliver derved i en vis udstrækning udtryk for "branchens" visioner for en udvikling baseret på systemleverancer og Mass Customization

Målet er at industrialisere eller ny-industrialisere byggebranchen, for derved helt overordnet set at opnå bedre og billigere byggerier. Mikkelsen et al [Mikkelsen et al., 2005] opstiller en række forhold, der kendetegner industrialisering, og som adskiller det fra byggeriets traditionelle arbejdsform:

- Viden om produkt og proces er eksplicit dokumenteret  
Produktet er beskrevet/ specificeret, som det skal være ved leveringen, samt som det er opbygget. Alle processer (konfigurering af produktet, anskaffelse af dets materialer og komponenter, fremstilling, transport, indbygning, afprøvning, anvendelse/ drift og vedligeholdelse) er gennemarbejdet og beskrevet.
- Metodefasthed og gentagelse  
Arbejdsprocessernes metodeforskrifter følges konsekvent. Gentagelsen af operationer skaber rutine.
- Styret udfaldsrum  
Produktet og processerne er gennemtænkt med hensyn til sikkerhed for gentagelse. Tolerancer er analyseret og fastlagt som krav – under hensyn til realiteterne.
- Kvalitet via processen  
Metodefastheden og rutinen betyder, at den tekniske kvalitet bliver som specificeret. Kvalitetssikrende tiltag – herunder fornødne kontroller – er planlagt som aktiviteter i processen. Målemetoder og kvalitetsdokumentation er indbygget i processen.
- Tilpasset, rigtigt produktionsapparat  
Systemer, produktionsapparat og faciliteter er tilpasset produktet og processerne. Dels af rationaliseringsgrunde, dels for at sikre metode og kvalitet.
- Tillært og trænet arbejdskraft  
Arbejdskraften er uddannet i at anvende metoderne og værktøjerne. I nogle tilfælde endda som specialarbejdere med den multifaglighed, som produktet fordrer
- Reproducerbar teknologi  
Der er valgt teknologier og udførelser, som opfylder krav om sikkerhed for gentagelse, overholdelse af tolerancer og korrekte kvalitet.
- Produktudvikling integreret med procesudvikling  
Forsat produktudvikling og produktforbedring organiseret for produktets hele livscyklus og integration af fagdiscipliner og teknologier
- Kompetence  
Gedigen indsigt i produktets funktionalitet og teknologi samt i alle processerne og deres forudsætninger. Denne kompetence udvikles til stadighed gennem organiseret videntilførelse udefra og gennem udviklingstiltag
- Læring  
Alle arbejdsprocesser – og produktet i dets brugsfase – overvåges og evalueres med henblik på opsamling af erfaringer, som kan føre til forbedringer og omkostningsreduktion. Læringsprocessen er organiseret.
- Markedsorientering  
Produktet skabes til et markedsbehov og med sigte på udbredt anvendelse.

[Mikkelsen et al., 2005]

### 1.4. Industrialisering vs. nyindustrialisering

Forskellen på industrialisering og nyindustrialisering er, at sidstnævnte ikke fokuserer på at producere standardprodukter i størst muligt styktal, som det særligt sås i perioden fra omkring 1950 til '70, og som gav os de store planbebyggelser. Denne udvikling er levende beskrevet af Svend Bertelsen [Bertelsen, 1997]. I nyindustrialisering handler det om Mass Customization. I artiklen "Making Mass Customization Work" [Pine et al., 1993] beskriver Pine et al., hvilke industrier Mass Customization vil være relevant for:

"Continuous improvement will continue to be a very viable strategy for companies whose markets are relatively stable and predictable. But those companies whose markets are highly turbulent because of factors like changing customer needs technological advances, and diminishing product life cycles are ripe for mass customization." [Pine et al., 1993]

Byggemarkedet er, og vil antageligvis blive ved med at være, turbulent og følsomt overfor både nationale og internationale forandringer både i forhold til sociale, politiske og økonomiske strømninger. På den baggrund konkluderer Thomas Ryborg Jørgensen at Mass Customization med sin fleksibilitet netop kan være relevant for byggeriet. [Jørgensen, 2007]. Men samtidig er byggebranchen ikke fremstillingsindustrien, og et hus er ikke det samme som en bil. I bilindustrien kan man nøjes med at tilbyde kunder at tilpasse (konfigurere) nogle relativt få parametre, såsom lakkens farve og indtrækket og at vælge mellem nogle få motormodeller og måske to eller tre gearkasser. Men kunden har ikke mulighed for at få foretaget

ændringer på hverken chassiset eller karossen og bede om et lidt større bagagerum, lidt ekstra frihøjde eller bare en ekstra sikkerhedssele på bagsædet. [Beim et al., 2007]. I byggeriet er det ikke tilstrækkeligt at tilbyde kunderne at vælge farven på væggene og gulvets træsort. Et godt byggeri, eller i det mindste et byggeri med god arkitektur, skal opfylde byggeprogrammet, brugernes og samfundets forventninger, det skal relatere sig til konteksten i forhold til tid, sted, kultur og historie. [Mikkelsen et al., 2005]. Dette gør, at der må udvikles en anden og mere kompleks måde at anvende Mass Customization på til etageboligbyggeri og arkitektur generelt. [Jørgensen, 2007]. På en række områder er et byggeri måske mere sammenligneligt med et industrielt procesanlæg, som eksempelvis cementfabrikker. Netop den store danske producent af cementfabrikker FLSmidth A/S (FLS) har opnået gode resultater i forhold til salgs- og designprocesserne ved i sin tilbudsgivning at anvende et konfigureringsystem. Cementfabrikker er store, komplekse produkter med en høj grad af individualitet. Denne individualitet er drevet af kundernes ønske om en optimal fabrik i forhold til de tilgængelige råstoffer, den ønskede kapacitet, opetid, emission, osv. Ved at bruge en Produkt Variant Master (PVM), har FLS redefineret den modulære struktur i deres produktarkitektur. Dette har eksempelvis reduceret antallet af forskellige møller fra omkring et hundrede til otte. Denne nye produktstruktur og løsningsrum er styret af virksomhedens konfigureringsystem. Et system der alene medtager hovedelementerne (basic modules) i fabrikkerne. Eksempelvis er elementer, der forbinder disse hovedelementer, så som transportbånd og snegle, ikke medtaget. [Hvam, 2006, 1]. Dette viser, at det med brug af konfigureringsystemer er muligt, med standardiserede processer, at producere individuelle produkter. [Lund et al., 2005]. Dette er muligt hvis arkitekten, i sit arbejde med at designe enkelte bygningsdele eller hele bygninger bliver guidet af et konfigureringsystem. Dette kan enten være, som en integreret del af den BIM software, han normalt anvender, eller som et stand alone system. [Hvam et al., 2010], [Byggeriets Innovation, 2008], [Jørgensen, 2007]. Noget af litteraturen anviser, at konfigureringsystemerne kan stilles til rådighed af byggevarereleverandøren, eks. [Byggeriets Innovation, 2008], mens andre ikke besvarer dette spørgsmål, eks. [Hvam et al., 2010]. Under udviklingen af den præfabrikerede skakt, var der et ønske om, at NCC skulle udvikle en badeværelses- og skaktkonfigurator, som kan stilles til rådighed for arkitekterne. Udover at understøtte arkitektens designarbejde, bør konfigureringsystemerne også levere data til entreprenørens planlægnings- og kalkulationssystemer. Set fra byggevarereleverandørernes synspunkt bør systemerne også understøtte deres detailprojektering, udarbejdelse af bill of material (BOM) og igen priskalkulationer og dermed gøre disse processer mere strømlinede. Samtidig vil brugen af et konfigureringsystem sikre, at det der designes, også kan bygges og overholder de relevante regulativer.

I nogle tilfælde vil outputtet fra konfigureringsystemet kunne overføres til en 3D beton printer, der på eksempelvis 24 timer kan printe et hus. Bl.a. Massachusetts Institute of Technology (MIT) har eksperimenteret med sådanne printere, og da de arbejder efter et lag på lag princip, kan de producere meget avancerede former, såsom kegler og dobbelt krumme flader. Eller man kan forestille sig brug af CNC maskiner, der giver en stor fleksibilitet og som kan sikre effektiviteten selv ved meget små styktaal. [Jørgensen, 2007]. Jakob Knudsen har beskrevet en række af disse muligheder i sin bog "Hvordan man printer et hus". [Knudsen & Beim, 2009]. Disse eksempler viser at industriel produktion ikke behøver at give dårlig eller standardiseret arkitektur. [Lund et al., 2005].

Design eller konfigurering af et hus er langt mere kompliceret og har langt større økonomiske konsekvenser, end eksempelvis en bil eller et par sko. Der er derfor behov for, at Mass Customization i en arkitektonisk og byggemæssig sammenhæng har en række yderligere dimensioner, end det er set i produktionsindustrien. Ved at bruge Mass Customization i et samspil med brugerne og arkitekten, vil det måske være muligt at skabe større individualitet i det industrielle byggeri. [Lund & Nielsen, 2006]. Tidligere har vi set, at industrialisering og arkitektoniske værdier ofte har været i modstrid, eller som Professor Kristian Kreiner beskriver det, så er de to "odd bed fellows". Men også han har en forventning om, at industrielt byggeri i fremtiden godt kan give arkitektur af høj kvalitet. [Lund et al., 2005]. Mikkel Andreas Thomassen fra Byggeriets Innovation fremfører det mind-set, at et byggeprojekt skal opdeles i moduler med standardiserede grænseflader som sikrer, at modulerne kan udvikles separat. Et sådan system bestående af moduler vil gøre det muligt at holde fokus væk fra kompleksiteten og dermed blive en driver for innovation. [Lund et al., 2005]. Et lidt modsat rettet synspunkt fremføres af Professor Jan Søndergaard fra Kunstakademiets Arkitektskole. Han mener, at arkitekten skal have mulighed for at udnytte sin evne til at sætte sig i brugerens sted og skal have mulighed for at sikre, at byggeriet ikke bliver forarmet, af modulariseringen og gentagelsen, og dermed ikke udnytte sit fulde potentiale i forhold til den kulturelle og kunstneriske udvikling. [Lund et al., 2005]. En løsning på denne udfordring kan måske være den, der beskrives i bogen "ARKITEKTONISK kvalitet og & industrielle byggesystemer". [Beim et al., 2007]. Her gennemgår de seks cases, hvor det statiske system gøres til en platform, som det kendes fra bilindustrien. I de beskrevne cases har arkitekter, nogle gange sammen med ingeniør eller udførende virksomheder, designet sådanne systemer.

## 1.5. Modulbyggeri gennem tiden - anvendelse og visioner

Det i visionen beskrevne mål om ny-industrialisering, tager på den ene side sit afsæt i byggeriets historiske udvikling og distancere sig på den anden side fra den. I dette afsnit vil nogle af de modulopfattelser og industrialiseringstiltag, der har præget byggeriet igennem tiden blive gennemgået. Formålet er at nuancere begrebet modulbyggeri, et begreb der i dag ofte opfattes som negativt og hvor alene det at avende begrebet, som en del af løsningen, kan være hæmmende for debatten. Der fokuseres i afsnittet på baggrunden for det moderne/ industrielle byggeri, hvor modularisering var mest tydelig, men det nuværende postmoderne byggeri antages kendt af læseren, hvorfor kun nogle enkelte forholdt med særligt med relation til det industrielle byggeri beskrives.

### Det moderne byggeri

Arbejdet med industrielt baserede sig fra starten på de erfaringer der var opnået indenfor produktionsindustrien, hvor Henry Ford's udvikling og produktion af model "T" er det mest kendte. Fra 1920erne arbejdede arkitekter på at overfører metoderne til byggeriet. Her er et af de mest kendte og tidlige eksempler Le Corbusier's Pessac byggeri fra 1924. Her var målet at etablere billige huse, baseret på nogle få præfabrikerede og standardiserede modeller. I mellem krigsperioden havde denne type af byggeri dog kun en begrænset succes. [Rafiei & Rabbanin, 2011]. Arbejdet fortsatte

og kom bl.a. til udtryk i "The Modulor" [Le Corbusier, 1958], hvor Le Corbusier arbejder med opdeling i forskellige modulmål baseret på en for den tid fuldvoksen mand på 175cm, arbejdet trækker tråde tilbage til Leonardo Da Vinci og står i dag, som et ikon for det modulariske byggeri. I Bauhaus (1919-1933) æren i Tyskland arbejdede arkitekten Walter Gropius, med at udvikle byggesystemer svarende til princippet i lejetøjs byggeklodser (Tysk Baukasten), hvor bygningen består af præfabrikerede klodser.[Miller, 2001]. Bauhaus skolen blev dog lukket i forbindelse med den nazistiske magtovertagelse i 1933. Under anden verdenskrig udgav den tyske professor Ernst Neufert "Bauordnungslehre" og i 1946 udkom "A62 Guide for modular coordination" i USA, begge med det formål at udbrede standard modulmål. [Moduludvalget, 1960]. I norden var der også et stort behov for at effektivisere byggeriet og løse manglen på boliger. Et ønske som meget tydeligt kom til udtryk i montagecirkulæret fra 1960.[Bertelsen, 1997]. Inden da havde der dog gået en række forarbejder, hvor af byggeriets modul-koordinering, startende i 1956 må betegnes, som noget af det mest ambitiøse. Baggrunden for arbejdet var bl.a. at de hidtidige traditioner, der var under kraftige indflydelse af standard murstens og tømmer mål, var blevet sprængt og ikke mentes at kunne inkorporere de nye installationer, EL, varme og sanitet, de nye materialer og arbejdsmetoder. Samtidig var der i det nye industrialiserede bygger et stort behov for at koordinere de forskellige produkter indbyrdes. [Moduludvalget, 1960]

Citat: "De enkelte produkters mål og målvarianter her derfor båret præg af at være mere baseret på vedkommende virksomheds produktions-tekniske forhold en på, hvorledes produkterne skal kunne gå i spænd med andre produkter." [Moduludvalget, 1960]

Målet var at skabe en tværgående standard, der ikke bandt en enkelt leverandør, men skabte et fælles nordisk byggemateriale marked. Arbejdet tager udgangspunkt i standard modulmålet 1M på en decimeter og havde det formål at citat: "en begrænsning af antallet af forekommende varianter af tilslutningsmålene på byggeelementer..." [Moduludvalget, 1960]. Udover standard modulmålet blev der for at opnå en yderligere standardisering udvalgt en række præferencemål, bestående af et udvalg af foretrukne modulmål eks. 3M og 6M. Disse præferencemål var som udgangspunkt individuelle for forskellige bygningsdele, men indbyrdes koordinerede. [Moduludvalget, 1960] En række af disse modulmål spiller stadig, om mindre, rolle i dagens byggeri og ses tydeligt i eksempelvis køkkener og døre, men det for forholdsvis nyligt har haft en kraftig vigende betydning for vinduer, hvor mange producenter ikke længere arbejder med standardmål.

I den industrielle periode fra slutningen af 1940erne og frem til midten af '70erne fik præfabrikerede elementer en større og større betydning. Montagecirkulæret blev vedtaget i 1960 og havde til formål på fire år at etablere 7.500 lejligheder, krævede at projekterne var tilrettelagt og designet med henblik en brug af præfabrikerede og industrielt fremstillede moduler. [Bertelsen, 1997]. Tankesættet beskrives meget tydeligt i 1961 af Marius Kjeldsen der var chefarkitekt i boligministeriet.

"Et industrialiseret byggeri består af en række industrielt fremstillede enkeltdele. Der bringes til byggepladsen i en så færdig stand, at processen på selve byggepladsen indskrænker sig til en montage og samling af disse enkeltdele." Citat: Marius Kjeldsen (1924-2004) Chefarkitekt Boligministeriet [DR Produktion, 2005].

Den udvikling der her blev grundlagt, gav anledning til at der blevet opført de meget store "planer", som havde den fordel at de kunne begrunde de store investeringer i produktionsapparatet, men som også gav en høj grad af standardisering. Det er da også fra denne periode vi har fået den liden flatterende betegnelse "kransorsbyggeri". En række store entreprenør-ingeniør firmaer, som Larsen & Nielsen og Jespersen & Søn, deres egne modulbaserede byggesystemer. Systemerne blev eksporteret til store dele af verden og alene Larsen & Nielsen eksporterede deres system til mere end 25 lande. Samtidig blev systemerne udviklet så de op igennem perioden kunne håndtere en større og større varians. [Bertelsen, 1997].

## Postmoderne byggeri

Det postmoderne byggeri vi har i dag, er på mange områder baseret på det moderne byggeri, men markere også et skift i forhold til det moderne byggeri. Selv om de industrille byggesystemer blev bedre til at håndtere en større varians, så kunne de ikke følge med i de ændringer der skete i samfundet. Samtidig begyndte der, som en naturlig konsekvens at de nye metoder og de mange nye materialer at vise sig fejl i det industrialiserede byggeri og begrebet "byggesjusk" kom til at klæbe til de mere eller mindre industrielt fremstillede byggerier. [Bertelsen, 1997]. Efterhånden som velstanden i samfundet steg fik de store blokbebyggelser, mere og mere konkurrence fra enfamiliehuse, der i højere grad kunne tilfredsstille beboernes individuelle ønsker. Den værste bolignød ved at være dækket og blokbebyggelserne blev nu set som værende i modstrid med ønsket om individualitet og valgfrihed. [Rafiei & Rabbanin, 2011] Selv om markedet for enfamiliehuse blev mere og mere præget af typehuse, var metoderne ikke baseret på tanken om industrialisering og der skete en afindustrialisering af byggeriet. Svend Bertelsen beskriver udviklingen på denne måde:

Citat: "Meget arbejde måtte igen udføres som håndværk; standardløsninger, der var brugt år på at udvikle, blev forladt; måltolerancerne blev større og deres koordinering forsvandt, alt med det resultat at endnu mere arbejde måtte udføres på stedet. Og hel montagebyggeriets omhyggelig planlægning og styring gik stille og roligt i glemmebogen." [Bertelsen, 1997]

I forhold til byggevarer var ændringen mindre markant, de elementer, som over den industrille periode blev etableret som moduler fortsat er det. Eksempler på det er, vinduer, døre, skabe og betonelementer. Udviklingstakten er dog faldet markant og samtidig er der ikke længere det samme kobling mellem designet, de fysiske moduler i form af byggevarerne, produktionen af disse og anvendelsen af dem under udførelsen af byggeriet.

# Videnskabelig tilgang

### 2.1. Forskningstradition på DTU

På DTU Management Engineering's sektion for Operations Management og Production and Service Management er forskningstraditionen fokuseret om kritisk rationalisme [Haug, 2007]. Den bliver oftest realiseret via action research, eks. Morten Kvist 2010 [Kvist, 2010], og casestudier er traditionelt den mest udbredte forskningsmetode. Disse casestudier foregår ofte i store danske produktionsvirksomheder, som sektionen over en lang årrække har haft stærke relationer til. Generelt kan forskningen betegnes som værende inden for feltet af anvendt forskning.

I forhold til publicering af forskningsresultatet er sektionen, som resten af DTU, placeret i en forskningstradition, hvor publicering af artikler i peer reviewede videnskabelige tidsskrifter spiller en meget central rolle. Dette er en meget kvantitativ tradition, hvor ressourcer ofte bliver tildelt på baggrund af antallet af artikler og rankingen af de tidsskrifter, hvor i artiklerne publiceres. (Niveau 1 - ét point, Niveau 2 – tre point). Igen er niveauet opgjort ud fra antallet af gange, tidsskriftet er citeret i andre tidsskrifter.

### 2.2. Forskningstradition på CINARK

Baggrunden for dette projekt er i vid udstrækning baseret på tidligere arbejde på CINARK. På denne baggrund er det naturligt kort at se på den der værende forskningstradition, ikke deres videnskabelige udgangspunkt, men på hvordan man generelt interagerer med den videnskabelige verden. Her har CINARK en anden tradition, end vi ser på DTU, hvor kommunikationen på DTU hovedsageligt foregår via konferencer og peer reviewede tidsskrifter, udvalgt af den ministerielle styrelse for forskning og innovation. CINARK anvender en mere fri form, hvor kommunikationen er rettet både mod den videnskabelige verden og mod offentligheden, og publiceringerne foregår ofte i bøger og artikler i fagblade som eks. Arkitekten.

Formentlig på grund af den arkitektoniske baggrund og deres fokus på at formidle til en bredere kreds end forskningsverdenen alene, er særligt bøgerne ofte meget velillustrerede og skrevet i et frit sprog, der gør dem meget læsevenlige. Sproget er ofte dansk, og den frie form betyder bl.a., at de ofte ikke beskriver og følger en stringent videnskabelig metode og heller ikke lægger den samme vægt på citering, som man ser i peer reviewede tidsskriftsartikler. Publiceringerne kan i større eller mindre grad have karakter af debatindlæg, hvor udtalelser og synspunkter mere er baseret på holdninger end på en traditionel videnskabelig argumentation. Som et eksempel på dette kan nævnes CINARK-publiceringen "Brugerinddragelse" [Lund & Nielsen, 2006], hvor der på side 9 står:

Som det fremgår af de følgende sider findes der nemlig, blandt arkitekter, en helt anden holdning til, hvilke værdier, der kan skabes, når man fokuserer på brugerne. [Lund & Nielsen, 2006].

Man kan sige, at denne form hænger godt sammen med arkitektens traditionelle rolle i et byggeprojekt. Alle deres valg kan være valide, men begrundelserne for disse valg kan være uklare, da de netop er baseret på arkitektens opfattelse. Dette er netop en af grundene til at man nogle gange kan sige hvem arkitekten har været bare ved at kigge på en bygning.

### 2.3. Videnskabelig tilgang i dette projekt

For at vælge den videnskabelige tilgang i dette projekt må der ses på de opstillede forskningsspørgsmål. Som det ses, kan de ikke besvares med et "Ja" eller "Nej". Ej heller med et for sådan et blødt forskningsområde mere typisk svar, "Ja, men..." eller "Nej, men...". Her er der brug for et mere komplekst svar baseret på en induktiv forskningstilgang. Men samtidig kan visionen i en vis udstrækning opfattes som en form for hypotese. Måske ikke en særlig veludformet hypotese, men stadig en slags hypotese. Arbejdet med at realisere visionen vil automatisk have karakter af en form for test af denne, som det kendes fra en deduktiv forskningstilgang. Dette giver en situation, hvor der arbejdes med to forskellige forskningstilgange jfr. Multi Methodology paradigmet. Denne type af forskning er ikke det nemmeste for en ny forsker [Mingers & Gill, 1997], men er dog et naturligt valg med det blandede grundlag, som dette projekt baserer sig på. I bogen "Designing a Research Projekt" opstiller Verschuren og Booreward nedenstående oversigt over forskellige tilgange, som et forskningsprojekt kan tage. Denne liste kan bruges til at beskrive, hvordan de forskellige tilgange vil blive anvendt i kombination.



Videnskabelige tilgange:

1. Theory-developing research  
Giving contributions to a theory and then testing whether these contributions has consistency and usefulness.
2. Theory-testing research  
Testing a theory against practice using hypothesis based on the theory.
3. Problem-finding research  
Identifying important subjects for a given matter.
4. Diagnostic research  
Searching for the cause of a dysfunction.
5. Design-oriented research  
Developing a plan or model for a design process.
6. Intervention-oriented research  
Comparing a desired process with an actual process as it is carried out, by monitoring the process as it.
7. Evaluation research  
Evaluating the comparison in an intervention-oriented study based on assessment criteria.

[Verschuren & Doorewaard, 2010]

Ved at gennemgå denne listen skabes der et overblik over, hvordan de forskellige tilgange passer til og kan bruges i dette projekt.

1. Theory-developing research  
Behovet for denne type af forskning hænger tæt sammen med tilgang 2. Hvis den eksisterende teori virker på etagebyggeri, vil der ikke på den baggrund være behov for at udvikle nye teori. På den baggrund må denne tilgang have en lavere prioritet end den teoritestende tilgang 2. Det forventes dog, at der i større eller mindre omfang til blive behov for at udvikle nye teorier, hvorfor denne tilgang må forventes at få en forholdsvis stor anvendelse.
2. Theory-testing research  
Brugen af Mass Customization og de underliggende teorier i produktionsindustrien er meget velbeskrevne. Men spørgsmålet, om hvorvidt de kan bruges i forbindelse med etagebyggeri, er meget centralt i dette arbejde, hvorfor tilgangen må gives fremtrædende plads.
3. Problem-finding research  
Udgangspunktet for dette arbejde er ikke at fokusere på problemer, men på muligheder – muligheder for at realisere visionen. Men hvis Theory-testing research viser, at nogle af teorierne vanskeligt kan anvendes, vil Problem-finding research være et naturligt skridt, inden der arbejdes med udvikling af ny teori.
4. Diagnostic research  
Mange, både indenfor og udenfor byggebranchen, vil sige, at der er en del dysfunktion i byggebranchen, og de har antageligvis ret. Men dette arbejdet er fokuseret på, hvordan tingene kan gøres bedre, og så længe disse metoder ikke er udviklet, kan det ikke betegnes som en dysfunktion, at de ikke anvendes. Når de nye metoder er udviklet, kan der være en række dysfunktioner, der forhindrer en realisering, og dette arbejde vil sporadisk berøre dette.
5. Design-oriented research  
  
Dette er et meget relevant udgangspunkt, og traditionelt har denne tilgang spillet en central rolle i den forskning, der er blevet foretaget på instituttet, og det vil også indgå i dette arbejde. Men som for den diagnose orienterede forskning er første skridt at udvikle de tekniske metoder, hvorefter der kan arbejdes med at designe de processer, der skal anvende løsningerne.
6. Intervention-oriented research  
I byggebranchen er der en meget begrænset anvendelse af Mass Customization, og da de processer, der faktisk forløber, er langt her fra, vil studier af den nuværende situation (as-is) og forsøg med mindre interventioner i denne (to-be) kun spille en begrænset rolle.
7. Evaluation research  
Da den interventionsbaserede forskning kun vil spille en begrænset rolle, vil også den evaluerende forskning være begrænset. Fokus vil hovedsageligt være på at vurdere, om løsningerne rent funktionelt virker, og ikke så meget på den aktuelle værdiskabelse. Dette, fordi man ikke vil kunne forvente, at en ny løsning umiddelbart vil kunne konkurrere med en traditionel og optimeret proces. En ny metode kan derimod danne grundlag for nye optimeringstiltag, som langt overgår de muligheder, der var med den traditionelle proces.

Måden, hvorpå de ovenfor beskrevne forskningstilgange vil blive realiseret, er baseret på action research, en metode der er karakteriseret ved, at forskeren er en del af processen og i nogle tilfælde endda styrer den proces, som undersøges. [Karlsson, 2009]. Denne metode er valgt, både fordi der er en tradition for at bruge den på instituttet og fordi, den passer godt til et udviklingspræget arbejde som dette. Valget af denne metode giver dog også en række udfordringer, da emnet for dette arbejde af flere årsager er et vanskeligt område at bedrive action research på. En udfordring er, at der arbejdes med løsninger, der ligger forholdsvis langt fra, hvad der gøres i dag, og at det derfor vil kræve store ændringer at arbejde med igangværende byggerier – case projekter. Dette bliver særligt vanskeligt, fordi et byggeprojekt er præget af, at der er mange interessenter med betydelige økonomiske interesser. Vi kan ikke opføre et eller flere byggerier bare for at teste en eller flere nye løsninger. Det opførte skal kunne bruges, og en forøgelse af omkostningerne på eks. 5 % vil i næsten alle tilfælde være uacceptabel. Samtidig tager det år at gennemføre et byggeri, hvilket også hænger dårligt sammen med den treårige ramme, som et Ph.D. projekt har.

På den baggrund er arbejdet ikke foretaget direkte i igangværende byggeprojekter, men som teoretiske afprøvninger, med inddragelse af personer fra produktionen. Brugen af teoretiske afprøvninger udført som action research rejser et spørgsmål om, hvordan det sikres, at resultaterne passer til og bliver relevante i forhold til brug i den virkelige verden? Svaret på dette spørgsmål må være, at det altid vil være en risiko, når man bruger denne metode. En række faktorer medvirker dog til at reducere denne risiko:

- Visionen og forskningsspørgsmålene er baseret på andres arbejde, hovedsageligt på CINARK og NCC's arbejde med den præfabrikerede skakt.
- Arbejdet involverer i videst muligt omfang personer fra både produktionen og fra arbejdet med konceptbyggeri hos NCC.
- Personligt har jeg været en del af NCC's arbejde med konceptbyggeri siden det blev startet i 2007.

## 2.4. Brug af materiale fra CINARK mfl.

Som tidligere beskrevet er baggrunden for dette projekt en række bøger og artikler hovedsageligt skrevet på CINARK eller i samarbejde med CINARK. Som beskrevet har man på CINARK en anderledes forskningstradition, og særligt en anden tradition for publiceringer, end på DTU og dermed i dette projekt. Dette giver særligt to problemstillinger, begge i forhold til at citere materiale fra CINARK i de artikler, der publiceres i peer reviewede tidsskrifter.

- **Sproget**  
Meget af CINARK-materialet er skrevet på dansk, mens de tidsskrifter, der i denne sammenhæng er interessante, er på engelsk. Dette gør det umuligt eller næsten umuligt for læserne af artiklerne at kontrollere og udforske kilderne yderligere.
- **Kreditering af kilder**  
Ved review af en videnskabelig artikel, der ønskes optaget i et peer reviewed tidsskrift, har valget af kilder ofte en central betydning, og der gives mest kredit for at citere andre artikler, der er publiceret i peer reviewede tidsskrifter. Det forhold, at særligt artikler publiceret i det samme tidsskrift menes at give den højeste kredit, viser, at der ikke kun er tale om saglige begrundelser, men også en vis grad af snobberi og taktik. Men naturligvis er hovedårsagen, at denne type af artikler pga. peer review processen, uden yderligere undersøgelser må antages at være valide.

For at håndtere disse forhold er strategien, i forbindelse med udarbejdelsen af artikler, kun at citere CINARK materialet, når det er absolut nødvendigt af hensyn til tekstens validitet, og i nogle tilfælde oversætte og indsætte udsnit af teksten.

Dette udelukker også muligheden for at bruge citering til at give ekstra kredit til det arbejde, der f.eks. er foregået på CINARK, uanset hvor velfortjent det kunne være. Det er en pragmatisk løsning på denne tværdisciplinære udfordring. Det er vigtigt i denne forbindelse at sige, at dette ikke er, og skal opfattes som, en kritik af forskningstraditionen på CINARK. Det er blot en beskrivelse af en problemstilling, som opstår, når man arbejder på tværs af fagdiscipliner.

## 2.5. Vurdering af forskningsresultaternes pålidelighed

Forskningsresultaterne vil blive vurderes i forhold til tre udvalgte områder, for dermed at vurdere om de fundne resultater er pålidelige. [Silverman, 2001].

De tre områder er:

### **Pålidelighed**

Er de samme resultater inden for det samme område blevet nået af andre forskere, eller har den samme forsker opnået de samme resultater inden for forskellige områder. [Silverman, 2001].

### **Validitet**

Er de indsamlede data korrekte, og er der en valid sammenhæng imellem årsag og virkning. [Silverman, 2001].

### **Generaliserbarhed**

Er de opnåede resultater generelt gældende inden for det givne felt, eller er der tale om et specialtilfælde. [Silverman, 2001].



# Identifikation af forskningsspørgsmål

Visionen, som det fremgår, beskriver et meget bredt område. På visse områder er visionen fragmenteret, den peger i forskellige retninger, og den beskriver ikke klart, hvor der er behov for svar og ny viden. Der er derfor behov for at selektere i den og for klart at beskrive, hvor dette arbejde sætter ind. Dette kan formuleres som følgende forskningsspørgsmål:

”Hvordan kan Mass Customization og de underliggende teorier, i en dansk kontekst, realisere visionen om industrialiseret arkitektur, med anvendelse af systemleverancer?”

Dette forskningsspørgsmål er entydigt baseret på visionen, og selv om det ikke har været formaliseret og formuleret klart fra starten, har det entydigt været målet med dette arbejde at besvare netop dette spørgsmål. Udfordringen i dette overordnede forskningsspørgsmål er, at det er så bredt formuleret, at det i praksis er umuligt at svare fyldestgørende på, særligt inden for rammerne af et enkelt PhD projekt. Det har derfor været nødvendigt at splitte det op i mindre og mere specifikke del-forskningsspørgsmål og at foretage en selektion i dem. Dette har ikke været gjort entydigt fra starten af projektet, hvilket giver en risiko for at relevante dele er blevet overset eller glemt. For at undgå dette problem er spørgsmålene blevet fremlagt for en række kollegaer, både fra NCC og fra den danske og internationale forskningsverden, hvorefter de er kommet med input og kommentarer. Denne konsultation skal sikre, at de mest relevante områder er inddraget i den efterfølgende udvælgelse. De udpegede potentielle forskningsområder er arkitektur, organisation, jura, modularisering, implementering, brug af konfigureringsystemer og økonomi. I de følgende afsnit er de enkelte områder beskrevet, og i forhold til denne afhandling er de mest relevante udvalgt.

## Arkitektur

Arkitektur har, uanset hvordan det defineres, en central placering i dette projekt. Arkitektur er således en vigtig del af det bagved liggende materiale og af visionen. Begrebet indgår desuden direkte i det overordnede forskningsspørgsmål. Inden for dette område rejser der sig da også en række spørgsmål, som det vil være yderst relevant at få svar på. Det er spørgsmål som:

- Hvordan måles hvor god en given arkitektur er?
- Hvor stor og hvilken form for varians er nødvendig for at skabe god arkitektur?

Selv om der findes enkelte eksempler på tiltag for at besvare denne type spørgsmål, eks. ”A Quantitative Approach for Valuating Architectural Qualities” [Nordwall & Olofsson, 2011], ville der være stor værdi i at få belyst disse aspekter i en dansk kontekst og i en form der også fokusere endnu mere på de fysiske enkelt dele. En sådan besvarelse ville medvirke til, at denne side kunne ”optimeres” på en måde, der minder om det, der kan gøres inden for de mere teknisk betonedede discipliner. Nogle vil måske hævde, at spørgsmålene ikke vil kunne besvares pga. den natur, som arkitektur har. Uanset hvad, så har og får Mass Customization og dens betydning for arkitekturen, sammenlignet med de andre områder, andre steder stort fokus. På Kunstakademiets Arkitektskole er således et helt institut CINARK, som siden 2004 har fokuseret på dette område. Samtidig ligger hverken min uddannelsesmæssige baggrund eller min erhvervs erfaring inden for arkitekturen. På den baggrund har jeg valgt ikke at fokusere forskningen direkte på dette, men det vil naturligvis indgå som en integreret del af arbejdet med de øvrige spørgsmål.

## Organisation

Inden der kan arbejdes med, hvordan brugen af moduler, produktfamilier mm. bør organiseres i virksomheden, vil det være hensigtsmæssigt først at arbejde med, hvordan sådanne metoder kan bringes til at fungere ud fra en mere teknisk tilgang. Der vil derfor ikke blive foretaget decideret forskning på dette område.

## Jura

I forhold til jura er der en række spørgsmål, som det vil være interessant at få belyst. Det er spørgsmål som:

- Hvordan håndteres copyrights og ansvar i forbindelse med genbrug af løsninger over flere projekter?
- Hvordan kan forskellige udbudsformer skabe incitament til at udvikle og anvende systemleverancer?

Dette er helt åbenlyst meget vigtige og relevante spørgsmål, som umiddelbart kan angribes fra to sider. Man kan se på, hvordan man ved udformning af lovgivning og standardaftaler, så nye udgaver af AB og ABT, kan fremme brugen af systemleverancer. Man kan desuden se på, hvordan man håndterer spørgsmålene inden for rammerne af den eksisterende lovgivning, standardaftaler og forbehold. Jeg har dog ikke hverken uddannelses- eller erfaringsmæssig baggrund for at forske i juridiske spørgsmål. Disse områder vil derfor, på trods af deres store relevans, blive overladt til andre.

## Modularisering

Som det vil fremgå af teorigennemgangen, er moduler og modularisering en central del af Mass Customization, hvor kundetilpasningen ofte sker ved at sammensætte og kombinere en række standardmoduler og moduler med fastlagt varians. I forhold til produktplatforme er brugen af moduler og særligt genbrug af moduler på tværs af produktplatformen et meget centralt element, hvor der da også rejser sig en række spørgsmål. I produktionsindustrien og den litteratur, der beskriver de her gjorte erfaringerne sammen med det anvendte teorigrundlag, har der været meget fokus på fysiske moduler, herunder standarddimensioner. På den baggrund har det været naturligt at rejse det følgende spørgsmål:

- Hvordan kan man definere fysiske moduler baseret på standarddimensioner og standardmål?

I byggeriet har brugen af moduler været en del af strategien siden starten af industrialiseringen, med Le Corbusier [Le Corbusier, 1958] som en af de første pionere. Arbejdet med at koordinere standardmål på tværs af de Nordiske lande [Moduludvalget, 1960] bragte anvendelsen af moduler til sit hidtidige højdepunkt i 1970'erne. [Bertelsen, 1997]. Denne brug af moduler var hovedsagelig fokuseret netop på brug af standardelementer og -mål. Og selv om antallet af variationer og dermed graden af individualitet steg over perioden, er det med enkelte undtagelser generelt ikke blevet opfattet som god arkitektur eller i hvert fald ikke som tidssvarende arkitektur. Det gælder hverken i dag eller i den fremtid, vi umiddelbart mener at kunne se og vurdere. På den baggrund er det valgt ikke at arbejde med dette spørgsmål direkte, hovedsageligt fordi det ikke ser ud til at resultere i god arkitektur. Men også fordi der, hvis man ønsker at gå i denne retning, er rig mulighed for at kigge på det arbejde, der ligger fra den industrielle periode. Det er ikke hermed sagt, at fysiske elementer og modul- og standardmål ikke kan være en del af de løsninger, der arbejdes med her, men der vil blive fokuseret på muligheden inden for andre aspekter af moduldefinitionerne. Dette rejser et spørgsmål om, hvad disse andre aspekter kan være, og om vi tidligere har set en sådan fokusering i byggeriet?

- Har vi i byggeriet tidligere set eksempler på moduler bestående af andre aspekter end det fysiske?

Hverken de skriftelige eller mundlige kilder, der ligger til grund for dette projekt, nævner sådanne moduler. Det må derfor være relevant at undersøge tidligere tiders byggemetoder for at se, om der er elementer, der er blevet glemt og ikke er kommet med over først omskiftningen til det moderne modul og montage byggeri, og efterfølgende overgangen til det postmoderne byggeri.

Som tidligere beskrevet fokuserer store dele af litteraturen på produktionsindustrien. Dette er tilfældet både for den del af litteraturen, der beskriver teorierne, og for den del, der beskriver de erfaringer, der er med at anvende teorierne. Sidstnævnte beskriver i sagens natur, hvilken type industri, der arbejdes med, mens den del, der fokuserer på teorien, ofte ikke beskriver dette. Spørgsmålet om hvilken industri, og dermed også hvilken natur produkterne typisk har, er dog yderst relevant. For som det fremgår af visionen, er et byggeri ikke umiddelbart sammenlignelig med en bil eller et par sko. Man kan naturligvis sige, at byggerier er større og ofte også mere komplekse produkter, men hvad betyder det i forhold til modularisering? Hidtil har der ikke været fokuseret på denne forskel, og der er i forbindelse med dette studie heller ikke fundet beskrivelser af denne forskel. Der er heller ikke fundet undersøgelser af om, og i givet fald hvilken, betydning, dette har for, hvordan moduler indgår i forskellige typer af produkter. Et relevant spørgsmål må derfor være:

- Er der forskel på, hvordan moduler indgår i forskellige typer af produkter, og i givet fald hvilken?

## Implementering

I NCC har vi erfaringer med at implementere et industrialiseret etagebolig koncept "NCC Komplett™" [Thuesen & Jonsson, 2009]. Der var her tale om en "one-step" implementering af et byggesystem baseret på præfabrikerede moduler med en meget høj færdiggørelsesgrad. Her så vi en udvikling, hvor implementeringen, rent teknisk lykkedes, men hvor det samlede projektet mislykkedes. Projektet blev lukket ned i 2007. Dette foregik på et svensk marked, hvor den arkitektoniske kvalitet er lavere [Lund et al., 2005], om ikke andet så anderledes end, hvad vi normalt ser i Danmark. Resultatet af dette projekt var et tab af en størrelse, så kun meget få virksomheder i byggebranchen ville kunne overleve det. Ingen vil kunne acceptere det, hverken ud fra en økonomisk eller en ledelsesmæssig synsvinkel. Denne forhistorie gør, at det i NCC ikke vil være acceptabelt igen at gå efter en sådan "one-step" implementering af nye byggesystemer. I NCC er der derfor behov for, at nye metoder kan implementeres trinvis. Andre virksomheder, som MT Højgaard og SKANSKA, har erfaringer, der i en vis udstrækning kan sammenlignes med NCC's. Dette indikerer, at der, for at realisere visionen - ikke kun i NCC, men generelt i branchen - er et behov for at udvikle metoder til at implementere modularisering trinvis. Begrebet implementering dækker bredt. Der er ikke nogen faste definitioner, der siger, at netop dette er en forudsætning og langt mindre at det er den eneste forudsætning for implementering, hvad der da heller ikke er noget der peger på. Når det alligevel er valgt at fokusere på denne ene del af implementeringen, hænger det sammen med, som beskrevet ovenfor, at det er en forudsætning i NCC og formentlig også bredt i byggebranchen. Samtidig er trinvis modularisering ikke et område, der har fået det store fokus, om nogen overhovedet. I produktionsindustrien har fokus været rettet mod en fuld modularisering af hele produktet, "one-step" implementering. Baldwin og Clark siger direkte, at det er en forudsætning for at få gevinst ud af en modularisering:

"The beneficial effects of using modularization can only be achieved if the partition is precise, unambiguous and complete." [Baldwin & Clark, 1997].

Vi har set, at der i byggebranchen er et behov for trinvis modularisering. Dette kombineret med, at der ikke er fundet litteratur, der beskriver metoder til trinvis modularisering, og at det i en vis udstrækning er i modstrid med de gængse anvisninger fra produktionsindustrien, gør det relevant at stille spørgsmålet:

- Hvordan kan moduler implementere trinvist?

Dette spørgsmål hænger godt sammen med tesen om, at byggerier ligner store produktionsanlæg, som det eks. kendes fra FLS cementfabrikker. Og med forestillingen om, at FLS' erfaringer med en meget overordnet modularisering og konferering kan overføres til byggeriet.

## Konfigureringsystemer

Konfigureringsystemer har vist sig at være et godt værktøj for virksomheder, der ønsker at implementere en Mass Customization strategi. [Hvam et al., 2010]. Også inden for byggeriet er der set eksempler på brug af konfigureringsystemer. Denne brug har særligt været koncentreret om enkelte bygningsdele, som eks. altaner, vinduer og kviste. I forbindelse med udviklingen af NCC's præfabrikerede skakt blev der af bl.a. Arne Hansen fra RH Arkitekter fremført en vision om, at designet af skakt og badeværelser kunne understøttes af en configurator. [Byggeriets Innovation, 2008]

En sådan configurator skal arbejde med et meget stort eller uendeligt løsningsrum. Det er i modstrid med, hvordan gængse konfigureringsystemer arbejder, men det vil samtidig være typisk for konfigurering af løsninger til byggeriet. Det medfører et behov for at undersøge, hvordan en sådan konfigurering kan understøttes af forskellige konfigureringsteknologier og rejser således spørgsmålet:

- Hvordan kan designet af produkter med et meget stort eller uendeligt løsningsrum, understøttes af forskellige konfigureringsteknologier?

En tilsvarende vision for brug af konfigureringsystemet, som vi ser for bygningskomponenter, ses også for hele bygningen. Måske ikke for alle detaljer i bygningen, men for den overordnede struktur. Som det fremgår af visionsafsnittet, er dette baseret på FLS' erfaringer med i salgs- og tilbudsfasen at anvende et konfigureringsystem. Da der ikke er fundet eksempler på en sådan anvendelse af konfigureringsystemer, rejser det spørgsmålet:

- Kan FLS erfaringer med at anvende et konfigureringsystem, til i salgs- og tilbudsfasen, at foretage det overordnede løsningsvalg, overføres til byggeriet?

## Økonomi

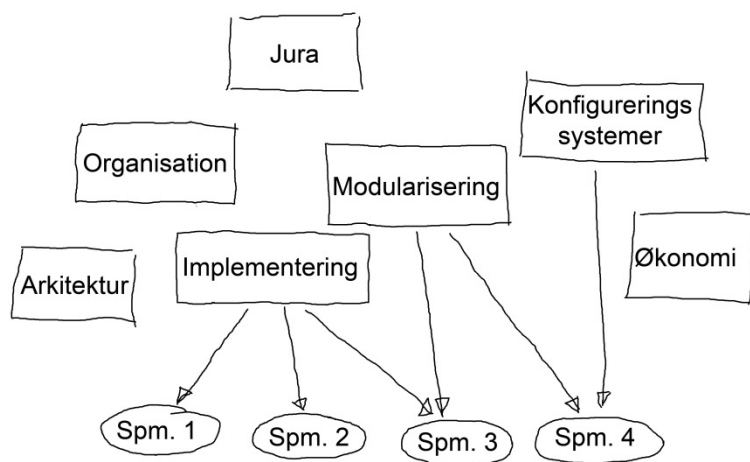
Økonomi er set med virksomhedsøjne altid relevant. Da vi ikke kan forvente at udviklingen vil blive drevet af lovgivning og tilskudsordninger, som det sås med montagecirkulæret fra 1960 [Bertelsen, 1997], må vi forvente, at udviklingen vil skulle drives af et ønske om profit. Når dette er sagt, må det konstateres, at vi i dag ikke har de metoder, der skal til for at producere industriel arkitektur, og derfor heller ikke for alvor kan evaluere det økonomiske potentiale hermed. Vi kan heller ikke pege på, hvordan og af hvem de nødvendige investeringer skal foretages, samt hvordan eventuelle økonomiske gevinster vil blive fordelt mellem byggeriets parter. Uden at betegne dette arbejde som grundforskning løsrevet fra den kommercielle virkelighed, så er fokus i dette arbejde lagt på, hvordan visionen rent teknisk og funktionelt kan realiseres, og ikke hvordan den kan gøres profitabel. Dette lidt karikeret ud fra en devise om at "Hvis skæbnen af Wright-brødrenes projekt var blevet afgjort af en cost benefit analyse, så ville vi i dag ikke kunne flyve på charterferie". Lidt mere jordnært kan det siges, at der arbejdes ud fra en antagelse om, at gevinsterne ved dette arbejde ikke vil være direkte økonomisk målbare, men vil være en teknologisk platform, hvorfra den videre udvikling kan fortsættes. De økonomiske potentialer vil på denne baggrund ikke blive behandlet som et selvstændigt område, men vil alene blive taget i betragtning i forbindelse med konkrete implementeringsforslag og i disse tilfælde kun i form af overslagsagtige cost benefit analyser.

### 3.1. Problemformulering

Inden for det overordnede forskningsspørgsmål er der identificeret en række potentielle forskningsspørgsmål og områder. Heraf er fire spørgsmål udvalgt til besvarelse i dette projekt. De fire spørgsmål fordeler sig inden for områderne moduler, implementering og konfigurering og lyder:

1. Hvordan er moduler tidligere blevet anvendt i byggeriet?
2. Hvad er forskellen på, hvordan moduler indgår i produkter i produktionsindustrien og hvordan de anvendes i en entreprenørvirksomhed?
3. Hvilke metoder kan anvendes til at implementere moduler trinvis i en entreprenørvirksomhed?
4. Hvordan kan konfigureringsystemer anvendes i en entreprenørvirksomhed til implementering af moduler/ produktarkitektur?

Spørgsmålene er en transformation af de områder der er udvalgt i afsnittet Identifikation af forskningsspørgsmål. Sammenhængen mellem de identificerede forskningsspørgsmål og de fire der er formuleret til direkte besvarelse fremgår af Figur 2.



Figur 2 Transformation fra potentielle forskningsområder til forskningsspørgsmål

Som det fremgår af afsnittet Identifikation af forskningsspørgsmål, så repræsenterer udvælgelsen af forskningsspørgsmålene i sig selv en væsentlig afgrænsning. Herudover er der en yderligere fokusering, drevet af både baggrunden for dette projekt, herunder NCC's markedsfokus, og af de generelle markedsforhold i den danske byggebranche.

### 3.2. Afgrænsninger og fokus

Afgrænsning og fokus for projektet har i vid udstrækning været påvirket af de øvrige aktiviteter på DTU, Aarch, CINARK og NCC. CINARK, Aarch og DTU ved at have leveret hovedparten af det materiale, der ligger til grund for den vision, som projektet er baseret på, se visionen i afsnit 1.3. DTU ved at komme med mindst i forhold til industrialisering, modularisering, konfigurering samt produktfamilier og ved at bidrage med metoder og teorier til at håndtere disse områder, se teori og metode del 4. Da projektet er gennemført som et Erhvervs Ph.D. projekt, har NCC's fokus også været et naturligt fokus for projektet, både i forhold til marked, implementering og produktionsmetoder. Baseret på de dårlige og meget dyre erfaringer, som NCC har haft med "NCC Complet" byggesystemet i Sverige, er fokus i dette projekt lagt på, hvad der kan betegnes, som "Åbne systemer".

Åbne systemer: "Ved byggesystemer med et åbent løsningsrum forstå, at komponenter og elementer er udformet med henblik på en fleksibel grænseflade, så de kan tilpasses andre byggelementer eller byggesystemer. Det åbne byggesystem er i højere grad baseret på en række principper for, hvordan eksempelvis komponenter kan samles (fælles standarder og regler for kombinatorik), end det er betinget af faste kombinationsmuligheder." [Mikkelsen et al., 2005].

NCC's markedsfokus i forhold til nybyggeri er i vid udstrækning koncentreret om kontor- og etageboligbyggeri og byggerier, der med en bred fortolkning kan opfattes som varianter heraf.

Samtidig er byggebranchen generelt præget af at være et nationalt marked, hvilket igen har været med til at sætte en afgrænsning forhold de byggesystemer der er blevet fokuseret på. I Danmark er der, sammen lignet med andre lande, en meget restriktiv kravstillelse til nybyggeri, dette samtidig med at der er relativt høje forventninger til det tekniske og arkitektoniske niveau. Dette betyder kvaliteten på det danske marked generelt er høj, særligt budniveauet er i forhold til boligbyggeri er høj i Danmark. [Lund et al., 2005]. På den baggrund er der fokuseret på en dansk bygge-

tradition, hvilket giver en afgrænsning i forhold til de internationale nyindustrialiseringsstrømninger med fokus på præfabrikation og automatiseret produktion. [Girmscheid & Scheublin, 2010].

Et andet forhold, der gør sig gældende på det danske marked, er, at der uden for leverandørledet ikke findes store kapitalstærke spillere, der dominerer markedet, eller veldefinerede dele heraf. Denne begrænsede adgang til kapital gør, at nye byggesystemer skal kunne udvikles og anvendes trinvis. Der er simpelthen ikke grundlag for "Big bang" implementering, en udviklingsform der, jfr. erfaringerne med NCC Complet, også må betegnes som meget risikobetonet.

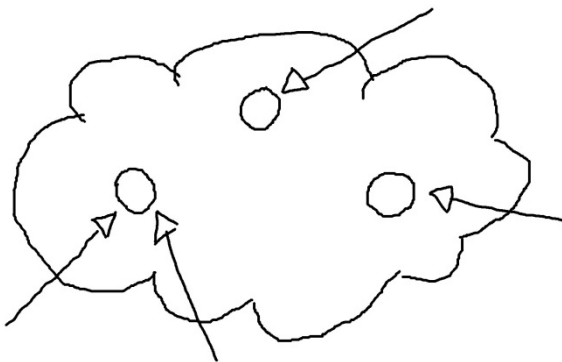
Der fokuseres således på byggerier, som vi kender dem på det danske hjemmemarked. Dette kan siges at være et noget snævert fokus, markedets størrelse taget i betragtning. For eksempel "Systemleverancer i byggeriet – en udredning til arbejdsbrug" [Mikkelsen et al., 2005] argumenterer for, at man skal fokusere på et internationalt marked for at kunne begrunde udviklingsomkostningerne. Når denne afhandling alligevel fokuserer på det danske marked, er det ud fra en antagelse om, at danske byggerier har en højere standard og er underlagt en strammere lovregulering, end man ser i lande, vi normalt sammenligner os med. Antagelsen er, at hvis det virker i Danmark, så vil det – om ikke andet så rent byggeteknisk – også virke andre steder, naturligvis med de tilretninger en markedsflytning altid vil kræve.

Disse afgrænsninger er hverken foretaget ud fra forskningsresultater eller ud fra en holdning om, at dette er den eneste rigtige. Beslutningen er alene baseret på NCC's historik, som gør, at det er den eneste politisk acceptable måde at arbejde med modularisering på i NCC og med NCC's markedsfokus. Samtidig med at det empiriske grundlag, netop er centreret omkring NCC.

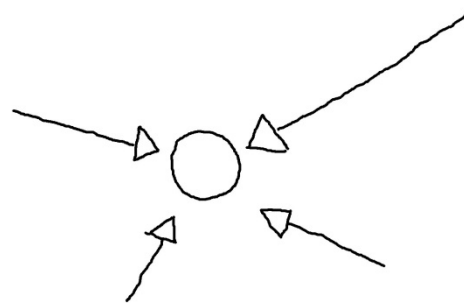
### 3.3. Forskningsdesign og gennemførelse

Dette projekt er ikke gennemført som en lineær proces. Noget af arbejdet er foregået over lange perioder og er forløbet parallelt med andre forsknings- og kursusaktiviteter. Andre dele er foregået i korte, relativt koncentrerede forløb.

Arbejdsformen har på et afgørende punkt adskilt sig fra, hvad der er typisk for Ph.D. projekter på DTU Management. Hvert step har generelt haft en større bredde og været på et højere abstraktionsniveau end skridtet før, og der er således ikke blevet gravet dybere og dybere ned i et specifikt spørgsmål. Årsagen er i et vist omfang visionens bredde, men hovedårsagen skal findes i, at det løbende, ved brug af en deduktiv tilgang, har vist vanskeligheder ved uden videre at overføre teorier, der er udviklet til produktionsindustrien til byggebranchen. Der har derfor snarere været et behov for at udvide forståelsesrammen end at grave dybere med i brugen og udviklingen af enkelte teorier. Ved løbende at udbrede feltet har det været muligt med en induktiv tilgang at udvikle nye teorier og hypoteser. Den induktive arbejdsform er tydeligst kommet til udtryk under arbejdet med Module Application Matrix, men er også til en vis grad blevet anvendt i det arbejde, der er beskrevet i artiklerne "Modularization in the Construction Industry through a Top-Down Approach" og "Stepwise Modularization in the Construction Industry through a Bottom-Up Approach". Denne kombination af induktion og deduktion kan i et vist omfang beskrives som en pluralistisk metodetilgang eller Multi methodologi [Mingers & Gill, 1997], men afviger også fra denne metode. Der er ganske vist brugt forskellige metodetilgange, efter principperne om Multi methodologi, men for at dække den meget brede vision har de forskellige metodetilgange været anvendt på forskellige dele af visionen og ikke på et specifikt område som normalt, når der arbejdes med Multi methodologi. Se Figur 3 og 4.



Figur 3 Metode i dette projekt



Figur 4 Traditionel Multi methodologi

I den konkrete gennemførelse af projektet har det første skridt været at finde og lære de teorier der ligger bag alle de "buzzwords" der er i visionen. De anvendte metoder og teorier er beskrevet i del 3 Metoder og teorier. Efterfølgende er der arbejdet med mulighederne for at anvende teorierne i byggebranchen.





# Metoder og teorier

I dette kapitel vil en række af de metoder, teorier og paradigmer, der er anvendt i projektet, blive gennemgået. Hovedparten af områderne er velbeskrevet i litteraturen, og formålet med denne gennemgang er ikke, at den skal kunne anvendes som en lærebog i forbindelse med konkret anvendelse af teorierne. Gennemgangen skal i opfattes som en introduktion, der skal give læseren et overblik, inden de oprindelige kilder opsøges. Denne form er valgt af to årsager. En væsentlig målgruppe for dette arbejde er personer i byggebranchen. Da hovedparten af teorierne stammer fra, og hovedsageligt er anvendt i produktionsindustrien, må det forventes, at denne gruppe af læsere ikke på forhånd har kendskab til teorierne og derfor har behov for at danne sig et overblik og en forståelse. Endvidere er teorierne ikke udviklet som en del af dette arbejde. En detaljeret og anvendelsesorienteret gengivelse ville således nemt kunne få karakter af afskrift/oversættelse af de oprindelige kilder, måske endda i en grad så det selv i en tydeligt citeret form kunne komme på kant med reglerne for copyright.

### 4.1. Mass Customization

I begyndelsen af den industrielle tidsalder formulerede teoretikere som Frederick Taylor (1856-1915) principperne om standardiserede produktionsprocesser. Disse teorier bliver realiseret af Henry Ford (1863-1947), som udviklede masseproduktion baseret på samlebånd. Disse udviklinger gav en signifikant forbedring af produktiviteten, men medførte også en meget høj grad af standardisering af produkterne. Efter op mod hundrede år med denne produktionsform begyndte forbrugerne at efterspørge mere individuelle produkter [Russel & Taylor, 2009]. Stanley Davis anvender i sin bog "Future perfect" fra 1987 begrebet "Mass Customization" [Rafiei & Rabbanin, 2011], og blandt pionererne i arbejdet med at tilfredsstille de individuelle kundeønsker uden at give afkald på fordelene ved masseproduktion var det Joseph Pine, der i 1992 systematiserede metoden og definerede Mass Customization på denne måde:

"Developing, producing, marketing and delivering affordable goods and services with enough variety and customization that nearly everyone finds exactly what they want."

[Kilde: "Mass Customization - The New Frontier in Business Competition"], [Salvador et al., 2009].

Grundprincippet i Mass Customization er baseret på den logiske slutning:

"why wouldn't people want to be treated as individual customers, with products tailored to their specific needs" [Salvador et al., 2009].

Det er underforstået: Hvis de kan få det individuelle produkt til samme eller næsten samme pris som standardproduktet. Denne slutning er driveren for det både praktiske og teoretiske arbejde med at realisere Mass Customization. En meget udbredt metode til at virkeliggøre Mass Customization har været brug af moduler med standardiserede grænseflader, styret som en produktplatform. Ved at kombinere, konfigurere, forskellige moduler opnås et produkt med netop de egenskaber, som den enkelte kunde ønsker - et individuelt produkt. Modulerne, derimod, kan fortsat masseproduceres på traditionel vis med de fordele, denne produktionsform giver. Særligt lav pris og høj kvalitet er i den forbindelse interessant, da det er to parametre, hvor individuelle produkter, produceret på traditionel vis, har det svært.

Princippet om Mass Customization kan være relevant for to typer af virksomheder. Den ene type er virksomheder, der traditionelt har masseproduceret standardprodukter (make-to-stock), men som ønsker at tilbyde deres kunder et mere individuelt produkt. Den anden type er virksomheder, der producerer individuelle produkter (make-to-order), men som ønsker at hente nogle af gevinsterne ved masseproduktion. Disse to indgangsvinkler til Mass Customization er godt beskrevet i "The long tail and innovation of new construction practices..." [Thuesen & Jonsson, 2009]. Uanset baggrunden er der mange eksempler på, at virksomheder kan opnå betydelige gevinster ved at anvende principperne om Mass Customization [Hvam et al., 2007], men de potentielle gevinster varierer alt efter virksomhedens baggrund. Eksempler på gevinster ved Mass Customization i forhold til masseproduktion:

- Kunden får oplevelsen af at få et produkt, der er lavet specifikt til hans behov.
- Kundetilpassede produkter har typisk en højere værdi for kunden, som derfor er villig til at betale en højere pris for produktet.
- De valg, kunderne foretager, kan give virksomheden værdifuld viden om mode og markedsudvikling og derved input til, hvordan den skal videreudvikle sine produkter.

Eksempler på gevinster ved Mass Customization i forhold til individuelle produkter:

- Højere kvalitet.
- Kortere leveringstid og lavere produktionspris.
- Lavere risiko i forhold til: funktion, pris, tid og kvalitet.

Uanset hvilken baggrund en virksomhed har, så kræver det en fokuseret strategi at profitere ved at anvende principperne om Mass Customization. Centrale elementer i en sådan strategi bør ifølge bogen "Produktkonfigurerings – kundetilpasning af produkter" [Hvam et al., 2007] være:

- Fokuseret markedsstrategi, dvs. en klar strategi for, hvilke kunder man ønsker at servicere med hvilke produkter. Og viljen til at afvise kunder, der ligger uden for segmentet.
- Salg og produktionsforberedelse af kundetilpassede produkter ved anvendelse af produktkonfigureringsystemer.
- Et modulopbygget produktsortiment, hvor et kundetilpasset produkt sammensættes ved, at man udvælger, kombinerer og eventuelt tilpasser et sæt af standardmoduler.
- Masseproduktion af standardmoduler og kundeinitieret montage af kundetilpassede produkter baseret på anvendelse af moduler.
- Installation og after sales service af produkter baseret på installation og udskiftning af moduler.

Disse elementer kan virke fjerne for en traditionel byggevirksomhed, og det er da også de færreste danske virksomheder i den udførende del af branchen, der systematisk har arbejdet med at indføre Mass Customization. Der hvor metoden, inden for byggebranchen, har fundet en vis udbredelse, er i materialeindustrien. Virksomheder, som Grundfos, Velux, samt nogle producenter af rulleporte, køkner og badekabiner har i større eller mindre grad anvendt princippet. På niveauet den totale bygning, har grundideen særlig været udbredt inden for hal- og staldbyggerier og den spiller også en vis rolle inden for enfamiliehuse og tæt-lav-bebyggelse. Et meget omfattende eksempel på sidstnævnte er Pregnant House (<http://www.pregnanthouse.dk>), der er udviklet af Exners Tegnestue A/S, nu E + N Arkitektur A/S, i samarbejde med en række partnere. Der er dog, seks år efter, endnu ikke født nogen bygninger på baggrund af Pregnant House projektet. Inden for etagebyggeri, rettet mod det professionelle marked, spiller Mass Customization endnu ikke nogen reel rolle på det danske marked, selv om det er en af grundideerne bag for eksempel NCC's konceptbyggeri.

Ud over de tidligere nævnte strategiske tiltag ligger der i Mass Customization også en anden tilgang til omkostninger, pris og profit, end man traditionelt ser i den udførende del af byggebranchen. Den traditionelle opfattelse af sammenhængen mellem omkostninger, pris og profit:

Produktionsomkostning + profit = Markedspris

[Pine, 1993]

I Mass Customization er tilgangen vendt om og tager i stedet udgangspunkt i, hvad markedet er villig til at betale. Opfattelse i Mass Customization:

Markedspris – produktionspris = Profit

[Pine, 1993]

Udfordringerne ved byggeriets eksisterende forretningsmodel og potentialerne ved andre modeller er yderligere beskrevet af Erik Kærgaard Kristensen i hans Ph.D. afhandling "Systemic Barriers To a Future Transformation of the Building Industry". [Kristensen, 2011].

## 4.2. Produkter

Inden vi kan se på produktfamilier og værktøjer til at håndtere sådanne, må begrebet produkt belyses og anvendelsen af det må defineres til brug i denne sammenhæng.

I dette projekt er begrebet produkt defineret som:

"Et fysisk objekt eller en service, som en virksomhed udbyder til markedet"

Denne definition er specifik for denne afhandling, men grundlaget er hovedsageligt hentet fra "Systemleverancer i byggeriet - en udredning til arbejdsbrug" [Mikkelsen et al., 2005] hvor systemprodukter beskrives på følgende måder:

"Fremtidsbilledet af hvordan et byggeri med anvendelse af systemprodukter kan indledes er, at bygherren - sammen med en hovedrådgiver - shopper rundt mellem forskellige systemleverandørers tilbud/ muligheder." [Mikkelsen et al., 2005]

Definitionen kan umiddelbart opfattes, som meget bred. Den har dog en central begrænsning; virksomheden skal udbyde produktet på markedet. Dette betyder ikke nødvendigvis, at virksomheden skal have deres produkt liggende på lager, hvilket i mange tilfælde vil være umuligt, tydeligst i forhold til service ydelser. Men det betyder, at produktet skal være defineret til et vist niveau. Virksomheden skal vide, hvad den sælger, hvordan det produceres og skal have, eller vide hvordan den får adgang til det produktionsapparat, der skal til for at producere produktet. Et eksempel på noget, der i dette projekt ikke vil blive betraget som et produkt, er forskning og udvikling. Der er tale om ydelser, hvor en del af leverancen er at definere, hvad leverancen skal være - dette uden kendskab til det mulige løsningsrum. Hvis vi ser på byggebranchen i dag, så udgør produkter, som de defineres her, kun en meget lille del af det, de udførende virksomheder producerer og udvikler. I "Forskningsopgaver i systemleverancer" [Hvam & Mortensen, 2007] beskrives forskellen til andre industrier på denne måde:

"F.eks. tradition for at udvikle gennem de enkelte byggeprojekter, ..., manglende tradition for produktudvikling til et potentielt marked." [Hvam & Mortensen, 2007].

Dette kan også beskrives med følgende sprogbillede, der uden at være fuldt dækkende ofte er hørt:

"Vi har ikke nogen produkter, vi har kun projekter."

Men hvorfor har virksomhederne kun projekter og ikke produkter? Det ved vi ikke præcist, men en årsag kan være tradition. En anden årsag kan være, at der er stor variation i det virksomhederne producerer, at udviklingsomkostningerne vil være for høje. Det er her produktfamilier bliver relevante.

### 4.3. Produktfamilier

Ethvert firma, der ønsker vedvarende succes, bliver nødt til kontinuerligt at forny og forbedre sig, således at nye aktører og skiftende kunde krav ikke fører til tab af markedsandel og profit. En måde at opnå dette på er at benytte teorien om produktfamilier. [Meyer & Lehnerd, 1997].

Den grundlæggende forskel på at have en række produkter og at have en produktfamilie er fokus. I stedet for at fokusere på de enkelte produkter retter en virksomhed, der arbejder med produktfamilier, fokus mod hele porteføljen af produkter og relationerne mellem disse. De ser lighederne i stedet for forskellene mellem deres produkter, og på den baggrund arbejdes der med at udvikle løsninger, der kan genbruges på tværs af deres portefølje af produkter – deres produktfamilie.

Definition af en "Produktfamilie":

"A product family is a larger set of end products constructed from a much smaller set of components"

[Ulrich & Tung, 1991]

Ved at arbejde med produktfamilier kan virksomheden opnå en række gevinster, såsom større indkøbsvolumen og effektiv udnyttelse af mandskab og materiel, hvilket igen giver mulighed for at forrente større investeringer i udvikling og i produktionsapparat. [Kvist, 2010].

Der findes i litteraturen en lang række beskrivelser af cases, hvor virksomheder fra forskellige brancher har anvendt produktplatforme. Eksempler på dette er "Kundetilpasning af produkter" [Hvam et al., 2007] og "The Power of Product Platforms" [Meyer & Lehnerd, 1997]. De fleste af disse cases beskriver virksomheder, som producerer fysiske produkter, men det er også eksempler på virksomheder, som anvender produktfamilier til at håndtere processer, services og viden. [Pedersen, 2010].

En vigtig forudsætning for at kunne arbejde med produktfamilier er, at virksomhedens produkter er opbygget af moduler. Der findes en række metoder til at opdele et produkt i moduler. Her kan nævnes Modular Function Deployment, se afsnit 4.7 og DSM – Design Structure Matrix. [Eppinger, 2001].

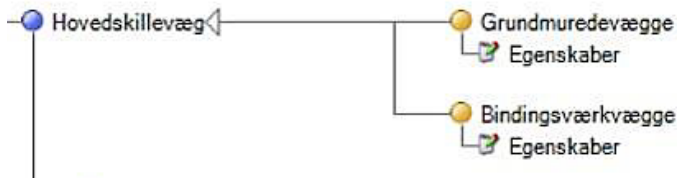
### 4.4. Produkt Variant Master

En Product Variant Master (PVM), der også betegnes Product Family Master Plan (PFMP), er en diagrammeringsteknik, der kan anvendes til at skabe overblik over et givet produktprogram. Modellen er horisontalt opdelt i tre views. Et customer view, der beskriver de kundeønsker, der stilles eller ønskes opfyldt. Det kan eksempelvis være i forhold til udseende, funktionalitet eller miljømæssige forhold. Et Engineering view, der beskriver de tekniske løsninger, der er i produktet. Det kan eksempelvis være ventilations- eller statiske principper. Og et part view, der beskriver de typiske fysiske komponenter, produktet består af. Det kan eksempelvis være vinduer, døre og betonelementer. Se Figur 5.



Figur 5 Udsnit af PVM – Part view

De elementer, der indgår i de tre views, er som udgangspunkt opdelt i en "part of" struktur i venstre side, hvor de elementer, der indgår, beskrives. Efter behov kan der foretages en yderligere nedbrydning i en "kind of" struktur i højre side. Her beskriver de varianter, der findes af et givet element. Se Figur 6.



**Figur 6 Part of til venstre - Kind of til højre**

Ved at sammenholde oplysningerne i de tre views kan produktets elementer og variationer optimeres, så ikke-værdiskabende varians undgås. Dette gøres ved at sammenholde udvalget og variationen af komponenter i Part viewet og de tekniske løsninger i Engineering viewet med kundekrav og -ønsker i customer viewet. [Lund & Nielsen, 2006]. Dermed kan de varianter, der ikke er gode argumenter for at have i produktet, reduceres eller helt fjernes. Det, at et produkt indeholder unødige varianter, betegnes "ikke-værdi skabende varians" [Nielsen, 2010] og eliminering af disse kan fjerne de omkostninger, der ligger i at have variansen, og give et større volumen og dermed lavere omkostning på de elementer, der forbliver i produktet.

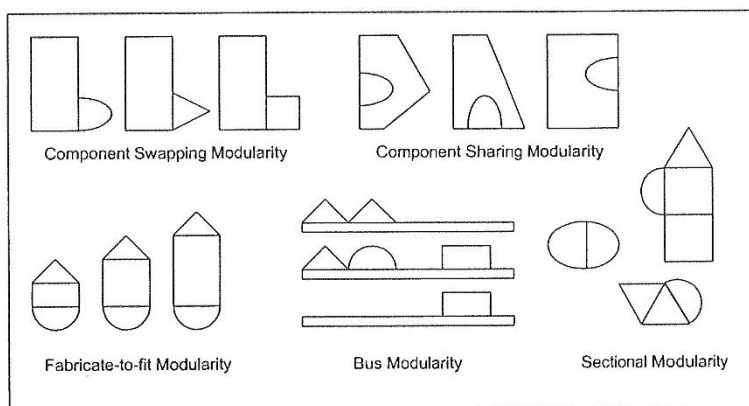
En anden vigtig anvendelse af PVM er som kommunikationsredskab i forbindelse med formidling af, og overvejelser om, virksomhedens produkter. Her giver opdelingen i de tre views og den successive tilgang, der ligger i træstrukturen, gode muligheder for både at danne sig et hurtigt overblik og at gå i detaljer med enkeltdelene. Særligt i forbindelse med formidling kan det være en stor hjælp at berige strukturen og den rå tekst med illustrationer og/ eller billeder af de forskellige elementer. [Hvam et al., 2007].

## 4.5. Moduler

Der findes ikke en entydig og alment udbredt definition af, hvad moduler er. Ej heller af dertil relaterede begrebet som modularitet og modularisering. Begrebet anvendes da også bredt til at beskrive forskellige former for elementer. Disse kan strække sig fra fysiske standardelementer over standarddesigns til modultål. Thomas Dedenroth Miller har i sin Ph.D. afhandling "Modular Engineering" [Miller, 2001] en gennemgang af en række modulopfattelser. Selv om afhandlingen har udgangspunkt i produktionsindustrien, går den bredere ud og inddrager andre områder, herunder byggeri, hvor både Le Corbusier's tanker, udtrykt i "The Modular" [Le Corbusier, 1958], og nogle af tankerne i Bauhaus bevægelsen, beskrives.

I dette afsnit er hovedvægten lagt på at beskrive en række forhold, der er fremherskende, når der tales om moduler i forhold til Mass Customization. Her dækker begrebet over en form for standardiseret enhed, en enhed, der ofte vil være en form for fysisk objekt. Et Modul udfylder en plads i produktet og udgøre således en del af et større hele. Ved at erstatte et modul med et andet kan produktets funktion ændres. En mulighed er også at anvende et givet modul i flere forskellige produkter. Hermed opnås et genbrug.

En ofte anvendt illustration af forskellige typer af modularitet, er vist i Figur 7.



**Figur 7 Forskellige typer af modularitet [Ulrich & Tung, 1991]**

Her er det vigtigt at lægge mærke til "Fabricate-to-fit Modularity", som viser, at de enkelte moduler i sig selv kan tilpasses. Et andet vigtigt forhold, som ikke vises af illustrationen, er, at et modul selv kan bestå af moduler og således lægger sig op ad den anden og meget mere stringente teori om objektorientering. [Hvam et al., 2007]. Netop muligheden for at opbygge moduler af moduler giver gode muligheder for tilpasning af moduler på en mindre fukssvans-baseret måde, end det umiddelbart fremgår af Fabricate-to-fit Modularity. Denne form betegnes også cut-to-fit Modularity.

Det har en række potentielle fordele ved at opdele et produkt i moduler med veldefinerede grænseflader, frem for at have produktet organiseret som en sammenfiltret spagettistruktur. Blandt de væsentligste potentialer er mulighederne for:

- at designe hvert modul uden påvirkninger udefra over de fastlagte interfaces
- at producerer hvert modul individuelt og på forskellige lokationer, herunder præfabrikation.
- at lette kvalitetssikring og fejlsøgning via individuel test af hvert modul
- at kundetilpasse produktet ved at vælge de relevante moduler
- at udvikle en ny version af produktet ved alene at udskifte et eller flere moduler [Harlou, 2010]
- at levere after sales service og opgradering baseret på udskiftning af moduler.

Man ser ofte, at moduler og præfabrikation anses for at være det samme. Et eksempel på dette er *Des Doran* [Doran & Giannakis, 2011], hvor der dog åbnes op for, at det præfabrikerede modul produceres on-site, hvorefter det monteres i bygningen. I denne afhandling betragtes modulære og præfabrikerede løsninger som to forskellige begreber, som ikke uden videre kan sammenstilles. Præfabrikerede løsninger er i denne sammenhæng løsninger, der ikke produceres på byggepladsen, men transporteres til byggepladsen og monteres i en større eller mindre proces på pladsen - en proces, der kan være mere eller mindre fastlagt. Moduler kan også blive produceret på byggepladsen, men de har ligesom de præfabrikerede løsninger et fastlagt indhold og fastlagte relationer til de øvrige dele af bygningen. Man kan sige at modul i en bygning ikke behøver at være præfabrikeret, men at en præfabrikeret løsning altid vil være et modul set i forhold til byggepladsen. Den modulære opbygning er således en forudsætning for at lave præfabrikerede løsninger.

## 4.6. Systemer og kompleksitet

De produkter, der arbejdes med i dette projekt, kan alle betegnes som systemer. Det er derfor relevant at gennemgå, hvad der i denne sammenhæng menes med begrebet "system". Jfr. Politikens retskrivnings- og betydningsordbog [Politikens retskrivnings- og betydningsordbog, 2013] kan et system beskrives som:

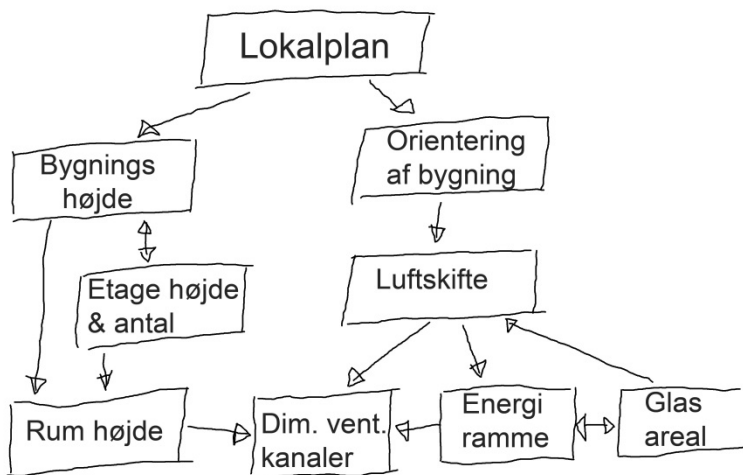
"Et hele af indbyrdes forbundne genstande". [Politikens retskrivnings- og betydningsordbog, 2013].

Denne beskrivelse er dog i forhold til dette projekt for simpel og ufuldstændig. Der er behov for mere detaljeret at beskrive de forhold, der ofte gør sig gældende i mere komplekse systemer. Et forhold er antallet af elementer. Det forhold, at et system har et betydeligt antal elementer, gør ikke i sig selv systemet komplekst. Hvis alle elementerne er ens eller kun består af nogle få variationer, vil man ofte kunne overskue et system med et stort antal elementer. Når der er tale om mange forskellige elementer, bliver det imidlertid noget vanskeligere. I tilfældet byggeri resulterer antallet og variationen af elementer i behovet for at opdele systemet i mindre dele f.eks. for at kunne fordele byggeopgaven mellem flere roller med forskellige kompetencer – den faglige opdeling. Et andet forhold, der gør sig gældende, er antallet og strukturen af relationer mellem elementerne. Et stort antal relationer er medvirkende til at gøre et system komplekst.

Relationerne kan således gøre, at ændringer ét sted, kræver ændringer mange andre steder, hvilket gør det vanskeligt at arbejde særskilt med de enkelte elementer. Et forhold, der kan vanskeliggøre det yderligere er relationer, der går i loops, hvorved elementerne direkte eller indirekte gensidigt påvirker hinanden. Et eksempel på systemiske sammenhænge kan se i Figur 8.

Årsagen hertil er meget klart beskrevet i bogen Structural Complexity Management.[Lindemann et al., 2009].

"Often when adapting one part of the system, dependencies result in change propagation and produce major consequences to the entire system" [Lindemann et al., 2009]

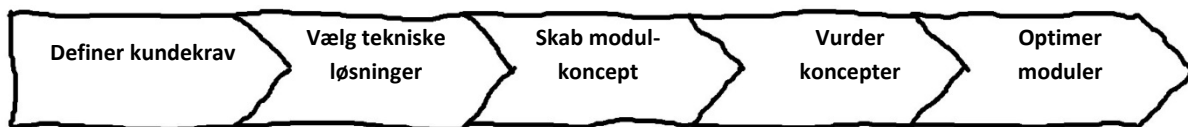


Figur 8 Eksempel på systemiske sammenhænge

Det er vigtigt at kunne overskue og kontrollere den kompleksitet, der er i et system. Her er Design Structure Matrix (DSM) og Modular Function Deployment (MFD) [Ericsson & Erixon, 1999] to metoder, der kan anvendes. Selvom der er mange lighedspunkter mellem de to metoder, har de lidt forskellige indfaldsvinkler til problemstillingen. DSM er et meget analytisk værktøj, der kan bruges til at forstå strukturen i et system og til at klarlægge kompleksiteten i et system. DSM vil typisk kunne håndtere større kompleksitet, men metoden kommer til gengæld med en beskrivelse, der kan være vanskelig at arbejde videre med. MFD går mere direkte efter at finde løsninger i form af et optimalt "modul koncept" [Ericsson & Erixon, 1999] med en så begrænset kompleksitet, som mulig.

#### 4.7. Modular Function Deployment

Modular Function Deployment (MFD) er en struktureret metode til – på et objektivt grundlag – at finde det optimale modul-produkt-design. [Ericsson & Erixon, 1999]. Metoden består af fem trin, som alle arbejder hen imod et profitabelt moduldesign. De fem trin kan ses i Figur 9.



Figur 9 Trin i MFD metoden

Her vil kun trin tre, skabelse af modulkoncept, blive gennemgået kort. Denne del er udvalgt, da den indeholder de såkaldte "Module Drivers" [Ericsson & Erixon, 1999] og samtidig viser grundprincippet i brugen af relationsmatrixer. Disse matrixer er også grundprincippet i den, i forbindelse med forståelse af komplekse strukturer, meget udbredte Design Structure Matrix (DSM) metode [Lindemann et al., 2009], [Eppinger, 2001]. DSM har dog ikke været anvendt direkte i dette projekt, da MFD metoden er blevet opfattet, som mere anvendelsesorienteret.

## Step 3 Skabelse af modulkoncept

Til at skabe modulkonceptet bruges *Module Indication Matrix* (MIM), se

Tabel 1, hvor produktets tekniske løsninger bliver vurderet i forhold til tolv "module drivers"<sup>TM</sup> fastlagt af Ericsson og Erixon på baggrund af fem års studier af en lang række cases [Ericsson & Erixon, 1999]. Værdierne 1, 3 og 9 viser styrken af den enkelte relation, med 9 som den stærkeste relation. Målet er at undgå uheldige sammenblandinger af stærke relationer. Eksempelvis skal man undgå en teknisk løsning, som både har stærke relationer til Planned product changes og Carryover. Her bør man i stedet overveje at opdele den tekniske løsning og dermed undgå en sådan sammenblanding. Omvendt kan det være fordelagtigt at samle tekniske løsninger, der har stærke relationer til den samme moduldriver og dermed holde antallet af moduler nede.

**Tabel 1 Module Indication Matrix (MIM)**

Module driver	Teknisk løsning	Teknisk løsning 1	Teknisk løsning 2	Teknisk løsning 3
Product development and design	Carryover	3	9	
	Technological evolution	3	3	3
	Planned product changes			9
Variance	Different specification			
	Styling			
	Common unit			
	Process and/or organization			
Quality	Separate testing			
Purchase	Supplier available			
After sales	Service and maintenance			
	Upgrading			
	Recycling			
Sum		6	12	12

For yderligere information om MFD henvises til en grundig gennemgang hos Ericsson & Erixon [Ericsson & Erixon, 1999], Petersen [Pedersen, 2010] og Kvist [Kvist, 2010]. De to sidstnævnte indeholder gode overordnede beskrivelser af MFD.

### 4.8. Én-til-én

Et af målene med at anvende MFD er at opnå én-til-én (one-to-one) sammenhæng imellem modul og funktion. Alternativt er én-til-mange eller mange-til-én klart at foretrække frem for mange-til-mange relationer mellem modul og funktion, noget der ofte vil medvirke til at give produktet en kompleks struktur. Princippet går grundlæggende ud på, at et modul har én funktion. [Ulrich, 1995]. Når dette er tilfældet, kan man ændre produktets funktion ved at tilføje, fjerne eller udskifte et enkelt modul. Et eksempel kan være, at en kunde ønsker læder frem for stof i kabinen på sin nye bil. Dette ønske kan opfyldes alene ved at udskifte modulet "stof-kabine" med modulet "læder-kabine". Et eksempel, hvor det ofte ikke er muligt at ændre funktion vha. et enkelt modul er, at kunden ønsker, at bilen skal kunne køre væsentligt hurtigere. Her vil man ikke kunne nøjes med at udskifte/opgradere f. eks. modulet "motor". Funktionen "hastighed" varetages af en række moduler. Man vil formentlig også skulle udskifte modulerne "gear", "kobling" og "træktøj". En endnu mere kompleks situation opstår, hvis man for at kunne håndtere den højere hastighed må forbedre bilens køreegenskaber i forhold til stabilitet osv. Da der ikke findes et køreegenskabs-modul vil man i stedet skulle ændre på eks. bilens stivhed, vægtfordeling, aerodynamik, længde og bredde - ændringer, der vil slå igennem i en lang række moduler og samtidig være indbyrdes afhængige. Netop dette er formentlig en af årsagerne til, at bilfabrikanterne inden for en enkelt model kun tilbyder deres kunder en begrænset fleksibilitet.

Én til én er således grundlæggende i bestræbelserne på at opnå Mass Customization, hvor man masseproducerer de enkelte moduler, for derefter at levere et produkt bestående af en konstellation af moduler, der netop leverer den funktion, der ønskes.

### 4.9. Konfigureringsystemer

Konfigureringsystemer opstod som begreb i 1980'erne og dækker over en type af IT-systemer, der i større eller mindre grad kan understøtte design og specifikation af et kundetilpasset produkt. En tydelig og meget anvendelsesorienteret definition på, hvad et konfigureringsystemer er, lyder:

"Software systems that create, use and maintain product models that allow complete definition of all possible product options and variations with a minimum of entries." [Bourke, 1998]



I den litteratur, der ligger til grund for visionen i denne afhandling, nævnes muligheden for at understøtte designprocesserne med konfigureringsystemer. Flere af disse beskrivelser har dog et forholdsvis højt abstraktionsniveau og beskæftiger sig ikke med, hvordan disse systemer rent teknisk fungerer. Et eksempel er rapporten om NCC's præfabrikerede installationsskakt. [Byggeriets Innovation, 2008]. Det forhold, at de tekniske detaljer udelades kombineret med, at der stilles en række gevinster i udsigt, kan medvirke til, at brugen af konfigureringsystemer kan fremstå som et teknologisk fiks. Inden der træffes beslutninger om at udvikle og anvende sådanne systemer, er det derfor vigtigt at have en forståelse, for hvordan konfigureringsystemer, som f.eks. Tacton Configurator, fungerer.

## Teknisk virkemåde

Et konfigureringsystem, adskiller sig fra et traditionelt IT-system ved ikke at være baseret på algoritmer. I stedet foretages ræsonnementer på baggrund af en videnbase og en inferensmotor. Videnbasen indeholder viden om de moduler (klasser og objekter), produktet kan bestå af, herunder information om alle variationer af disse. Eksempler på moduler i et konfigureringsystem kan ses i Figur 10.

Derudover indeholder videnbasen information om de regler (constrains), der gælder for objekterne. Et eksempel er, at der kun må vælges ét toilet i et badeværelse, eller at der i et rum med håndvask skal være et gulvafløb.

Ud fra de definerede moduler og regler genererer inferensmotoren alle de mulige kombinationer, der ligger inden for de givne rammer. Rent forståelsesmæssigt er dette et meget vigtigt skridt, der viser en væsentlig forudsætning for at anvende et traditionelt konfigureringsystem.

Der skal være et endeligt løsningsrum. Ikke bare et matematisk endeligt, men et IT-håndterbart endeligt løsningsrum. Det skal således på forhånd være muligt at beskrive alle tilladte løsninger. Løsninger, der ikke ligger inden for dette løsningsrum, er ikke tilladte og kan ikke konfigureres.

På baggrund af det genererede løsningsrum kan selve konfigureringen foretages. Denne operation kan opfattes som en sorteringsmekanisme, der udvælger de løsninger inden for løsningsrummet, der tilfredsstiller brugerens valg. Sorteringen kan dog være ganske analytisk, da alle konsekvenser af de foretagne valg medtages.

Eksempel på simpel sortering i løsningsrummet for et WC:

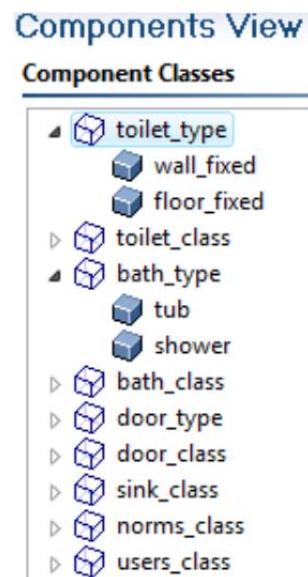
Klinkerne skal være hvide -> Alle andre farver frasorteres i løsningsrummet

Eksempel på mere analytisk sortering i løsningsrummet for et WC:

Der skal være armstøtte ved toilettet -> Toilettet er et handicaptolet -> Alle løsninger, hvor håndvasken ikke kan nås fra toilettet, frasorteres.

På denne måde reduceres løsningsrummet, så det kun indeholder den eller de løsninger, der tilfredsstiller kundens valg. Hvis der er mere end én løsning tilbage, kan kunden vælge imellem dem. Hvis kunden ikke kan få alle sine ønsker opfyldt, kan systemet enten hjælpe med at fortælle, hvad der skal til, for at et givet ønske kan opfyldes – ofte ved på et andet område at træffe et andet valg. Eller systemet kan fortælle, at den ønskede løsning ligger uden for løsningsrummet og derfor ikke kan håndteres af konfigureringsystemet.

Oven på disse mekanismer kan der placeres forskellige former for grænseflader. Det kan være mere eller mindre grafiske brugergrænseflader eller grænseflader til andre IT systemer, der udveksler in- og/ eller output data med konfigureringsystemet. Figur 11 viser et skærmbillede fra et konfigureringsystem



Figur 10 Eksempel på moduler

Figur 11

Skærmprent fra et konfigureringsystem

## Forretningsmæssige potentialer

Brugen af konfigureringsystemer kan have mange forretningsmæssige potentialer. Til inspiration vil nogle af de centrale blive kort beskrevet.

Der er en række eksempler på, at virksomheder har haft fordele ved at anvende konfigureringsystemer. Gevinsterne kan forekomme gennem hovedparten af virksomhedens processer fra salg over design til produktion. [Hvam et al., 2010]. Afhængig af den enkelte virksomheds strategi og markedssituation kan der være stor variation i, hvilke gevinster virksomheden efterstræber og opnår. Således er det ikke alle virksomheder, der opnår alle gevinster. Der er naturligvis også eksempler på, at strategier er mislykkedes, og at de ønskede gevinster ikke er opnået. Sådanne eksempler kommer dog sjældent offentligt frem.

## Eksempel på gevinster i salgsfasen

I salgsfasen har eksempler på gevinster været hurtigere og mere præcis prissætning med større sikkerhed for, at der tages hensyn til al relevant information. [Hvam et al., 2010]. Der er også mulighed for at stille konfiguratoren direkte til rådighed for kunden. Derved kan virksomhedens produkter og variationsmuligheder tydeliggøres for kunden. Konfigureringsystemet kan således reducere ressourceforbruget i salgsfasen og give bedre input til de efterfølgende faser.

## Eksempel på gevinster i designfasen

Det er ofte i denne fase, der kan opnås den største procentvise besparelse. For visse produkttyper er det muligt helt at automatisere designarbejdet og således gå direkte fra salg/konfigurering til produktion. Det kræver naturligvis, at der investeres i at udvikle de nødvendige systemer. Udover det rene rationaliseringspotentiale giver automatiseringen mulighed for at sikre en høj kvalitet i designmaterialet. For virksomheder med et forholdsvist lavt stykantal er det måske netop dette forhold, der kan gøre det rentabelt at investere i et konfigureringsystem, men det må naturligvis analyseres i hvert enkelt tilfælde.

## Eksempler på gevinster i produktionsfasen

Produktionen vil kunne profitere af den højere kvalitet i produktionsgrundlaget fra designfasen. Men særlig det forhold, at konfigureringsystemet bidrager til, at der sælges produkter inden for det definerede løsningsrum med kendte og fungerende løsninger, udgør et stort potentiale. Det definerede løsningsrum vil i mange tilfælde give en gentagelsesgrad, der gør det muligt at industrialisere produktionen.

### 4.10. Opsummering på teorien og metoder

De her introducerede metoder og teorier har i overvejende grad sit udgangspunkt i masseproducerende virksomheder, virksomheder der ønsker at opretholde høje styktaal, men samtidig i større grad være i stand til at individualisere sine produkter til individuelle kunder. NCC og den udførende del af byggebranchen i almindelighed, adskiller sig fra denne type af virksomheder ved at have et langt lavere styktaal. Dette samtidig med at bygninger er store og mere komplekse produkter, end det oftest ses i produktionsindustrien. Når det på trods her af er disse teorier og metoder, der er valgt, hænger det sammen med, at de repræsenterer centrale dele af den faglige tradition på området og indirekte er det teorigrundlag, der henvises til i visionen. Denne domæneflytning af teorien opfattes ikke, som et problem, men derimod som en central del af formålet med dette projekt. Den måde, det vil blive håndteret på i projektet, er ved i størst muligt omfang at holde fast i både de beskrevne metoder og i den natur, der ligger i byggeprodukter.



# Forskningsmæssige bidrag

I dette afsnit vil de forskningsmæssige bidrag fra dette projekt blive gennemgået. Afsnittet er opdelt efter de fire forskningsspørgsmål, der er formuleret i Del 3 Identifikation af forskningsspørgsmål. Inden for hvert spørgsmål gennemgås først det arbejde, der ligger til grund for besvarelsen. Derpå kommer en kort og direkte besvarelse af spørgsmålet, efterfulgt af en noget længere diskussion og perspektivering af svaret.

Hovedparten af arbejderne fremgår også af artiklerne, appendiks 1-5, men de er her struktureret i forhold til de enkelte forskningsspørgsmål. Da arbejderne i hovedtræk er udført i trin svarende til artiklerne, vil der være overlap mellem de arbejder, der ligger til grund for besvarelsen af de enkelte forskningsspørgsmål. Dette optræder på den måde, at et arbejde kan ligge til grund for besvarelsen af flere spørgsmål. Heraf følger, at der i gennemgangen af de arbejder, der ligger til grund for besvarelsene, er gentagelser. Det er dog tilstræbt reduceret i størst mulig grad.

### 5.1. Hvorledes er moduler tidligere blevet anvendt i byggeriet?

Den industrielle periode er naturligvis det mest oplagte område at undersøge, hvis man vil se på modulanvendelse i byggeriet. Som beskrevet i teori afsnittet blev der i denne periode udviklet og implementeret en række moduler, især med fokus på standardiserede modulmål. Perioden er dog forholdsvis velbeskrevet og danner grundlaget for hovedparten af den modulanvendelse, vi ser i dag. Et andet sted at fokusere er i perioden før industrialiseringen, det historiske byggeri. Her fandt der også modulanvendelse sted, uagtet at de hverken blev betegnet eller beskrevet som moduler. I overgangen fra det historiske til det industrielle byggeri var der ikke den forståelse for moduler, som vi har i dag. Der kan således være elementer af modulanvendelse, som er blevet glemt eller overset.

Inden spørgsmålet besvares, vil udvalgte dele af det arbejde, der ligger til grund for besvarelsen, blive gennemgået. Arbejdet er mere fuldstændigt beskrevet i artiklen "Modules in historic building construction according to the Copenhagen Building code", der findes i Appendiks 1.

### Moduler i historisk byggeri efter Den Københavnske Byggelov

Byggeriet i Danmark har i løbet af de sidste ca. 200 år været igennem en række udviklingstrin. Trinene kan ikke adskilles fuldstændigt, men kan som hovedtræk deles op i disse fire faser [Gottlieb, 2010].

- fra det sporadisk regulerede, men traditions- og fagbundne før 1856
- til det fast regulerede, men stadig traditionsbundne, ofte betegnet, som det historiske byggeri
- til det moderne industrielle byggeri der særligt kendes fra 1960'erne og 70'erne
- til det postmoderne byggeri, som vi kender i dag.

Udviklingen igennem de fire faser er blevet muliggjort af den teknologiske og samfundsmæssige udvikling og er hovedsageligt blevet drevet af ønsker om højere kvalitet og produktivitet. Her har især kvalitetsbegrebet udviklet og ændret sig en del undervejs, særligt fra det moderne til det postmoderne byggeri. I de tidlige faser var kvalitetsbegrebet hovedsagelig rettet imod brand, hygiejne og statik – forhold der i det moderne og postmoderne byggeri har nået et væsentligt højere niveau. Det gør at kvalitetsbegrebet i dag i langt højere grad retter sig imod arkitektoniske kvaliteter såsom individualitet i form af opfyldelse af specifikke behov og unikke udtryk.

Udviklingen har over hele perioden i vid udstrækning været drevet af en "væk fra" og ikke en "hen imod" tankegang. Det ses bl.a. af byggelovens forbud mod brandbare konstruktioner som bindingsværk [Engelmark, 1993] og de statslige godkendelser af utraditionelt byggeri, som forudsatte at andelen af timer udført af faglærte murersvende maksimalt måtte udgøre 15 % af det samlede timetal [Boligministeriets Produktivitetsfundsudvalg, 1954]. Denne "væk fra" tilgang har på en række områder betydet, at fortidens dyder er blevet glemt, uanset om de fortsat kunne have været. Et eksempel er cyclogrammer, en planlægningsmetode hvor man kombinerer aktiviteter med ressourcer og lokation. Denne metode blev med stor succes anvendt under det moderne byggeri [Partouche et al., 2008] men er stort set ikke blevet brugt efter overgangen til det postmoderne byggeri, antageligvis fordi den blev forbundet med standardbyggeri med en stor gentagelsesfaktor eller cyklusser. Men også det postmoderne byggeri har mange gentagelser og metoden bliver nu, mange år efter, genoptaget [Partouche et al., 2008].

Hypotesen for dette arbejde er, at der i det traditionelle byggeri var en række dyder, som gjorde det muligt at bygge individuelt byggeri på en på mange måder standardiseret måde. Dyder som vi i dag kender fra teorierne om Mass Customization, produktarkitektur med anvendelse af moduler, men som naturligvis ikke blev beskrevet som sådan i sin tid. Arbejdet vil give eksempler på, hvordan datidens byggeskik kan beskrives med nutidens teori, ikke for at skabe klarhed over fortiden – det vil vi overlade til andre fagdiscipliner – men for at vise, hvordan nutidens byggemetoder kan forbedres.

Strukturen for byggeprocessen har også ændret sig gennem tiden fra at være stringent opdelt mellem håndværksfag til i dag at være langt mere kompleks og bl.a. omfatte en række ingeniørdiscipliner. En opdeling, der også gør, at de arkitekter og ingeniører, der designer byggeriet, ikke har det samme kendskab som tidligere til, hvordan byggeriet vil blive udført. Samtidig er der kommet en langt større variation i byggeriet. Det ses bl.a. af, at det traditionelle byggeri i 1800-tallet havde en gentagelsesgrad omkring 50, hvor byggeriet i dag har en gentagelsesgrad på 2,5. Gentagelsesgraden er defineret som antal gange en given bygningsdel anvendes i byggeriet divideret med antallet af varianter af den givne bygningsdel [Gharib

& Nedelkovski, 2004]. Denne reducerede gentagelsesgrad har den naturlige konsekvens, at den rentable grad af arbejdsforberedelse bliver lavere, og at der ikke kan indarbejdes den samme rutine, hvilket igen går ud over produktiviteten. Den lave gentagelsesgrad betyder også, at der i dag er en markant øget risiko for, at der undervejs i byggeprocessen opstår fejl forårsaget af eks. kommunikationsbrister mellem projektets aktører, eller som følge af mangel på rutine med den specifikke og ofte unikke løsning.

## Den Københavnske Byggelov og byggetradition

Den Københavnske Byggelov trådte i kraft i år 1856 og kom derved til at gælde for den kraftige udbygning, der skete efter den indre forsvarslinje omkring København blev ophævet. "Da voldene faldt". Loven definerede en mindste standard for, hvordan der måtte bygges, og blev derved definerende for byggeriets kvalitetsniveau. Loven indeholdt detaljerede krav til bygningernes konstruktive og materialemæssige forhold, eksempelvis murtykkelser og tømmerdimensioner. Kombineret med loven fungerede den traditionelle fagopdelte byggeskik baseret på materialerne træ og tegl, hvilket samlet set fastlagde rammen for denne type af byggeri i omkring 100 år. [Engelmark, 1993].

Det overordnede design blev udformet af arkitekten med nogle få tegninger, i form af plan, snit og opstalter. Designet blev udformet under nøje kendskab til de efterfølgende byggemetoder, og designmaterialet kunne overføres direkte til de enkelte fag, der med en begrænset detailprojektering kunne udføres i byggeriet med metoder, der på forhånd var indlært, og som blev anvendt på alle byggerier.

## Analyse

Via Modular Function Deployment (MFD) metoden arbejdes der på at opdele det historiske byggeri i moduler og samle dem i en Produkt Variant Master (PVM).

### MFD step 1 – Definer kundekrav

I forhold til etageboligbyggeriet fra 1850 – 1900 var der ikke de store variationer i kundernes krav til produktet. Kunden fokuserede hovedsageligt på tre ting: Kvadratmeterpris (optimal udnyttelse af grunden), kvalitet og lejlighedsstørrelse. Der fandtes derimod lovkrav via byggeloven som skulle overholdes i forbindelse med opførelse af en etagebolig. Da der i denne del af analysen primært er fokus på kunden, er kun de lovkrav, der er i kundens interesse, udvalgt.

Kundekrav, lovkrav og bygningsegenskaber opstilles i MFD matrixen, Tabel 2.

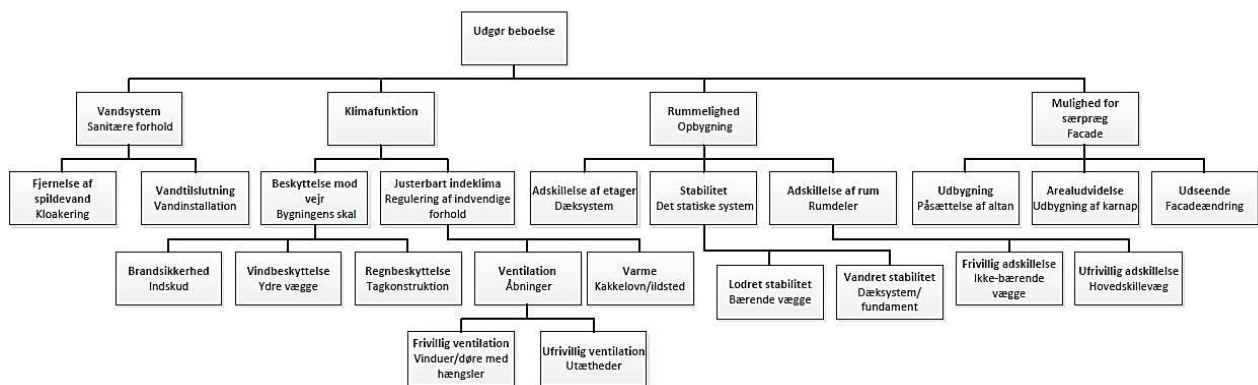
Tabel 2 MFD matrixe for etageboligbyggeri

Produkt attributter																	
Kundekrav	Vægt	Trend	Modularisering	Areal	Trapper	Etagenhøjde	Materialer	Isoleringsgrad	Antal rum	Tilgang til brændsel	Ventilationsevne	Lysindfald	Stabilitet	Installationer	Tilgængelighed	Udseende	Sum
Lav pris	5		9				9	3									21
Kvalitet	4		1				9	3					3	3		9	28
Størrelse	3			3		3			3								9
<b>Lovkrav</b>																	
God vandafledning	1						1							3			4
God brandsikkerhed	4				9		3	9			1						22
God tilgang til lys	4											9					9
God tilgang til vand	4													9			9
Høj bygningsstabilitet/sikkerhed	3						3						9				12
Stor rummelighed	3			9		9			3								21
Mulighed for regulering af varme	3							1		3	9			3			16
<b>Sum (vægt x relation)</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>49</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>103</b>	<b>66</b>	<b>18</b>	<b>9</b>	<b>31</b>	<b>36</b>	<b>39</b>	<b>60</b>	<b>0</b>	<b>36</b>	

Her er kravene prioriteret på en skala med værdierne 1,3 og 9 og vægtes indbyrdes på en skala fra 1 til 5, hvor 5 er højest relevans for kunden. Eksempelvis er *lav pris* en oplagt femmer, da kunden altid vil foretrække at betale så lidt som muligt. Herefter vurderes trenden inden for det pågældende krav, dvs. om trenden er stigende, stabil eller faldende - hvilket vises med hhv. grøn, gul eller rød farve. F.eks. har alle kundens krav en stigende trend, da fokus på kunden og dennes bevidsthed om egne krav er intensiveret siden tiden, hvor Den Københavnske Byggelov blev indført.

### MFD step 2 – Vælg tekniske løsninger

Efter step 1 er de tekniske løsninger opstillet. De tekniske løsninger findes vha. af et funktions-middel-diagram. Det bruges til at synliggøre produktets funktionelle struktur og dets dertilhørende tekniske løsninger. [Ericsson & Erixon, 1999]. Diagrammet giver et overblik over alle de tekniske løsninger, produktet indeholder.



Figur 12 Funktions-middel-diagram

Her er hovedfunktionen, at produktet skal udgøre beboelse. Til hovedfunktionen er der en række afledte underfunktioner, der alle skal tilvejebringes med de indgående tekniske løsninger.

### MFD step 3 – Skab modulkoncept

Til udarbejdelse af moduler anvendes Module Indication Matrix (MIM-matrixen), Tabel 3. Her bruges tolv forskellige moduldrivere til at finde sammenhænge mellem de tekniske løsninger. På forhånd forventes det, at områder som arbejdsmetoder, materialer og organisation, qua den stærke faglige opdeling, vil være hensigtsmæssige områder at danne moduler efter.

Tabel 3 Module Indication Matrix

Tekniske løsninger		Modul drivers																	
		Vandinstallation	Kloakering	Indskudsler	Fundament	Ydre vægge	Tagkonstruktion	Vinduer/døre med hængsler	Utætheder	Kakkellov/ Ildsted	Hovedskillevæg	Ikke-bærende vægge	Gulv/loft	Bærende vægge	Facade	påsættelse af altan	Udbygning af karnap	Facadeændring	Sum
Udvikling og design	Carryover	3	9		9	9	3	9			9	9		9	1	3	3		76
	Teknologisk evolution	3	3	3			1					3							13
	Planlagte design ændringer																		0
Varians	Forskellig specifikation						1								1				2
	Styling													9			1		10
Produktion	Fælles enhed	9	9	9	9	9	9	9			9	9	9	9	3	9	9		120
	Proces/organisation	9	9	9	9	9	9	9			9	9	9	9	3	9	9	9	129
Kvalitet	Separat testbarhed	1	1																2
Indkøb	Leverandør tilgængelighed																		0
Efter salg	Service/vedligehold																		0
	Opgradering															3	3	3	9
	Genbrug																		0
<b>Sum</b>		<b>25</b>	<b>31</b>	<b>21</b>	<b>27</b>	<b>27</b>	<b>23</b>	<b>27</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>27</b>	<b>27</b>	<b>21</b>	<b>27</b>	<b>17</b>	<b>24</b>	<b>24</b>	<b>13</b>	

Det ses, at de tre dominerende moduldrivere som forventet er carryover, fælles enhed og proces/organisation. Da det er de centrale drivere, følger her en kort beskrivelse af de tre moduldrivere:

- Med carryover menes, at der er en del af byggeriet, der uden ændringer overføres fra et byggeri til et andet, og som er stabil over tid. I dette tilfælde er den høje karakter skyldes, at de samme materialer anvendes flere gange og fra byggeri til byggeri.
- Fælles enhed er defineret som arbejdsmetoden, f.eks. om måden at lave og montere vinduet på er den samme fra gang til gang. På samme måde som carryover, vil en høj karakter angive, at arbejdsmetoden ikke ændrer sig mellem byggeprojekterne.
- Proces/organisation angiver, at det er det samme fag, der udfører opgaven. En høj karakter vil her angive, at de samme processer altid udføres af det samme fag.

Baseret på MIM-matrixen er der defineret otte moduler, se Tabel 4.

**Tabel 4 Definerede moduler**

Modul	Vigtigste driver	Tekniske løsninger
Installation	Proces/organisation	Vandinstallation
		Kloakering
Etageadskillelse	Proces/organisation	Indskudsler
		Gulv/loft
Bærende vægge	Proces/organisation	Ydre vægge
		Hovedskillevæg
Ikke-bærende vægge	Proces/organisation	Ikke-bærende vægge
Facade	Proces/organisation	Facade
		Opgradering
		Påsætning af altan
		Udbygning af karnap
	Facadeændring	
Vinduer og døre	Carryover	Vinduer og døre
	Fælles enhed	
	Proces/organisation	
Tagkonstruktion	Fælles enhed	Tagkonstruktion
	Proces/organisation	
Fundament	Fælles enhed	Fundament
	Proces/organisation	

#### MFD Step 4 – Evaluate concepts

For at analysere forholdene mellem modulerne defineres fem typer af grænseflader, specifikt til etageboligbyggeri, se Tabel 5.

**Tabel 5 Typer af grænseflader for etageboligbyggeri**

Grænseflade	Notation
Samme	S
Flade	F
Gennembrud	G
Påsætning	P
Organisation	O

Grænsefladen *samme* viser, at modulet har en grænseflade til et modul magen til sig selv og anvendes, hvis moduler af samme type mødes. Eksempelvis stables modulet *bærende vægge* for hver etage og har dermed grænseflader til sig selv. Med *flade* menes, at to forskellige moduler støder op til hinanden. Et eksempel på dette kunne være *bærende vægge* og *fundamentet*, da væggene hviler på fundamentet med en flade, se Tabel 6. *Gennembrud* betyder, at et modul gennembrydes af et andet, som f.eks. *den bærende væg*, der gennembrydes af *vinduer og døre*. *Facaden* er sat



uden på den bærende væg, og grænsefladen mellem disse to moduler er derfor påsætning. Endelig er grænsefladen organisation ensbetydende med, at modulernes fag mødes via deres processer, f.eks. når tømreren kan påbegynde sit arbejde med tagkonstruktionen umiddelbart efter, at mureren har færdiggjort den bærende væg.

**Tabel 6 Grænseflader i etageboligbyggeri**

	Installation	Etageadskillelse	Bærende vægge	Ikke-bærende vægge	Facade	Vinduer og døre	Tagkonstruktion	Fundament
Installation	S							
Etageadskillelse	G, O	S						
Bærende vægge		F, O	S					
Ikke-bærende vægge		F, O	F, O	S				
Facade	P, O		P		S			
Vinduer og døre			G, O	G, O	G, O			
Tagkonstruktion	P, O	F, O	F, O		F	G, O		
Fundament			F	F, O	P			

### Sammenfatning af Modular Function Deployment (MFD) i Produkt Variant Master (PVM)

De via MFD metoden beskrevne moduler er samlet i en PVM. PVM'en indeholder, udover de almindelige tre views customer, engineering og part, også de to ekstra views Proces og Organisation. Her er kun vist et udsnit fra Part- og Proces view.

Det sidste view, Organisation viewet, omfatter de fag, der deltog i bygningsprocessen. Specifikationer for dette view kunne være kompetencebeskrivelser. På daværende tidspunkt lå det implicit i de faglige traditioner for fagene og var som sådan selvfølgelig på den tid.

### Part view

I part viewet er komponenternes specifikationer og indbyrdes forhold i fokus. Regler og tegninger omhandler her egenskaber for de enkelte dele såsom dimensioner, se Figur 13 Part view – udsnit.

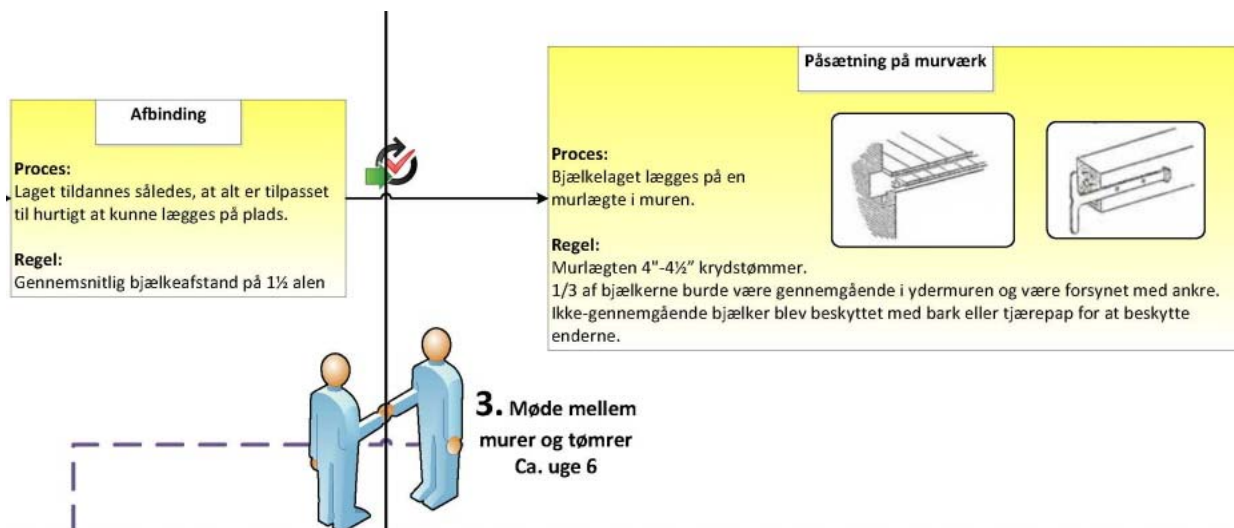


**Figur 13 Part view – udsnit**

Part viewet, hvor der her kun vises et lille udsnit, viser de enkelte moduler og dele med deres egenskaber. Viewet viser tydeligt den modulariske opbygning og de faste regelsæt, som gælder for de enkelte dele.

### Proces view

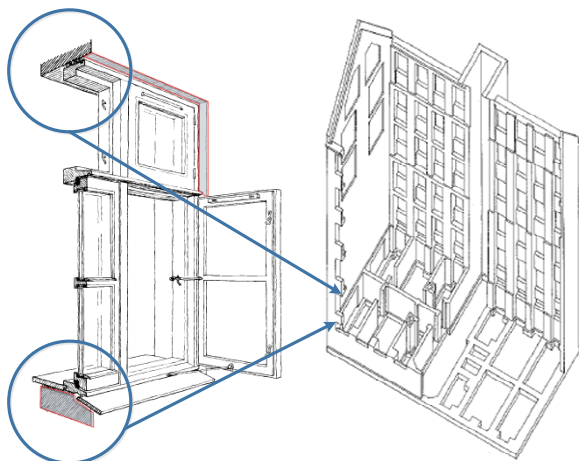
For at kortlægge processen er der udarbejdet en planche, der viser, hvordan processen og informationsflowet forløber igennem projektet. Kortlægningen viser, at processen kan opdeles i moduler (aktiviteter), og at denne opdeling følger opdelingen i de øvrige views. I de grænseflader, der går på tværs af fag, var der faste rutiner for informationsudvekslingen. Eksempelvis gav mureren en klar melding til tømreren, når en etage var opmuret og etagedækket kunne lægges. I Figur 14 ses et udsnit af et modul, der netop viser denne grænseflade.



Figur 14 Udsnit: Grænsefalde mellem murer og tømrer

## Eksempel på grænseflade

Ved indsættelse af vindue i den bærende væg ses et godt eksempel på fordele ved en fastlagt grænseflade. Mureren og snedkeren har klare roller og regler for, hvordan deres opgaver skal udføres. Heriblandt findes standarder for murens forskellige tykkelser, hvordan variationen i murens tykkelser skulle håndteres og for karmens placering. Dette muliggjorde både en standardiseret proces for isætning af vinduerne i den bærende væg, og en fastlagt informationsudveksling mellem murer og snedker, se Figur 15.



Figur 15 Grænseflade mellem murværk og vindue

Hvis ikke disse standarder havde været gældende, ville der for hvert byggeri og hver konstellation af murere og snedkere skullet have været udviklet en metode, som formentlig ville variere fra gang til gang; dette med en varierende proces og informationsudveksling til følge.

## Implementering

Modulerne var meget velimplementerede blandt datidens arkitekter og håndværkere. Så velimplementeret, at de må betegnes som kultur, som måden man gjorde det på uden at stille spørgsmål. Dette hænger sammen med at den lovgivning, som fastholdt metoderne, var gældende i en lang periode. Men modulerne var også indlejret i de enkelte fag, så lærlingene fra første dag blev indført i dem. Samtidig havde arkitekterne en håndværksmæssig uddannelse som gjorde, at de havde kendskab til hele den efterfølgende proces. Sidst, men ikke mindst, var metoderne gode, og der gik rigtig mange år, før der kom nye metoder, der kunne udkonkurrere dem.

## Var byggeri efter Den Københavnske Byggeslov varieret?

En vigtig forudsætning for, at vi kan uddrage erfaringer fra byggeri, udført efter Den Københavnske Byggeslov, er, at dette byggeri kan betegnes som varieret, og at løsningerne dermed kan siges at kunne anvendes til varieret byggeri. Om byggerierne var kundetilpasset eller standardbyggeri er

en definitionssag, og set i forhold til nutidens postmoderne byggeri kan man godt betegne det som standardbyggeri. Men set i forhold til datidens kundekrav var der gode muligheder for at levere den variation, som kunderne efterspurgte.

En lav kvadratmeterpris var for almindeligt boligbyggeri den vigtigste parameter for kunden, hvorfor dette ikke som udgangspunkt var et varierende kundekrav. Efterlevelse af dette krav gav dog anledning til varians. Det ses mest tydeligt i forhold til udnyttelse af den aktuelle grund, hvor en fuld udbygning var vigtig. De her beskrevne moduler gav alle mulighed for, at man kunne give byggeriet den ønskede grundplan og stillede derved den ønskede variation til rådighed.

Lejlighedsstørrelsen var et andet område, hvor der var behov for variation for at tilgodese forskellige grupper af beboere. Igen fastlagte bygge-loven en række minimumskrav, men når de var opfyldt, kunne man udforme lejlighederne, som man ønskede. Selvfølgelig målrettet de mest udbredte kundeønsker; Mass Customization produkter har aldrig skullet tilfredsstillende alle kundeønsker, men alene den valgte del af markedet.

Det arkitektoniske udtryk kunne i forhold til facadeudtryk varieres inden for tidens mode. Dvs., at der uden på bygningskroppen kunne monteres den facadeudsmykning, der var ønsket. Inden for almindeligt boligbyggeri var det således ikke selve bygningskroppens udformning, der blev brugt til at give det ønskede arkitektoniske udtryk. Dette var der dog en vis kritik af fra den arkitektoniske strømning "Europæerne". [Engelmark, 1993]. Men denne kritik var rettet mod byggelinjerne, der eksempelvis i en vis udstrækning forhindrede karnapper, og ikke imod de byggetekniske løsninger. Dette ses da også af, at man i 1878 udvidede mulighederne for at give dispensation i forhold til byggelinjerne; dette uden at det ændrede på de øvrige principper for byggeriet.

## Besvarelse af spørgsmålet "Hvorledes er moduler tidligere blevet anvendt i byggeriet?"

Inden for det historiske byggeri, der hverken i tiden eller efterfølgende er blevet beskrevet som modularisk, har vi set, at der var en række elementer, der med nutidens begreber kan beskrives som moduler. Det særlige ved modulerne i det historiske byggeri er, at de omfatter både organisation, kompetencer, processer, materialer og selve løsningerne. Dermed opstår der et bredere modulbegreb, i forhold til hvad der normalt beskrives, f.eks. i forbindelse med det industrielle byggeri. Samtidig var der ikke tale om virksomhedsløsninger, men om brancheløsninger der lå forankret i både lovgivningen og traditionerne.

## Vurdering af pålidelighed

Undersøgelsen baserer sig på en anerkendt metode til at etablere og beskrive moduler og modularisk opbyggede produkter i form af Modular Function Deployment (MFD) metoden [Ericsson & Erixon, 1999] og Produkt Variant Master (PVM) [Pedersen, 2010], [Hvam et al., 2007]. De analyserede data strammer fra Statens Byggeforskningsinstitut (SBI) Rapport 141, Københavns etageboligbyggeri fra 1850-1900 [Engelmark, 1993], en rapport der er baseret på både historiske kilder og på fysiske undersøgelser ved nedrivning i forbindelse med bysaneringer; en slags reverse engineering. I forhold til generaliserbarhed omfatter undersøgelsen en række, men ikke alle, bygningsdele, fag og materialer, men de undersøgte dele udgør væsentlige dele af datidens byggerier. Om andre undersøgelser skulle vise, at det sammen ikke gør sig gældende for de ikke medtagne bygningsdele mm., vil det ikke være udtryk for, at de fundne resultater ikke er pålidelige. I givet fald vil det vise, at der i det historiske byggeri var tale om en delvis modularisering. I forbindelse med dette projekt er der ikke fundet andre kilder, der undersøger modaliteten i det historiske byggeri, hvorfor der heller ikke er fundet kilder, der hverken underbygger eller er i modstrid med de her fundne resultater.

## Detalldiskussion

I besvarelsen af dette spørgsmål er der fokuseret på det historiske byggeri efter Den Københavnske Byggeslov, ud fra en hypotese om, at der her var en modulanvendelse, som adskiller sig fra fokuseringen på fysiske moduler og dimensioner, der efterfølgende er set i byggeriet. Samtidig havde denne form for byggeri et betydeligt omfang, og det udgør således hovedparten af byggeriet i de Københavnske brokvarterer. I valget af denne fokusering ligger der et fravalg af at undersøge den industrielle periode, som utvetydigt er den periode, hvor moduler har haft den mest centrale rolle i byggeriet. Fokuseringen er begrundet i, at den industrielle periode i sit udgangspunkt leverede meget standardiserede produkter, og at denne periode er velbeskrevet andre steder.

Analysen viser, at det over et hundrede år gamle byggeri efter Den Københavnske Byggeslov, med nutidens principper kan beskrives som bestående af moduler med fastlagte grænseflader. Dette både set i forhold til det fysiske, i form af bygningsdelene og materialer, men også i forhold til proces og organisering. Særlig interessant er det, at grænsefladerne følges ad på tværs af de forskellige views. Det var således murerne, der hovedsageligt ved anvendelse af teglmaterialer, etablerede bygningsdelen *bærende væg*, og tømmerne, der med træ etablerede bygningsdelen *etagedæk*. Det ses også, at grænsefladerne mellem de enkelte moduler var standardiserede og uafhængige af byggeriets dimensioner i øvrigt. Det er således muligt med nutidens metoder at beskrive det historiske byggeri som bestående af moduler.

Det ses også, at designet blev udført med kendskab til og under hensyntagen til modulernes begrænsninger og til de efterfølgende metoder. Og at der igennem processerne kun er ansvarsskift, når arkitekten overdrager sit materiale til de udførende fag.

Modulerne og deres grænseflader blev fastholdt i en meget lang periode. De var understøttet af lovgivning og indlejret i uddannelserne, hvilket samlet set gav optimale muligheder for, at løsningerne blev implementeret.

Når man kan beskrive det historiske byggeri med vores nutidige opfattelse som bestående af moduler, vil det være oplagt at spørge, om man dengang høstede nogle af de fordele, som i dag ofte fremføres som argument for at anvende moduler. Den rene måde at besvare dette spørgsmål på ville være en direkte sammenligning af produktivitet og kvalitet i nutidens og datidens byggeri. Men den teknologiske udvikling i almindelighed og en generel mangel på data vanskeliggør en sådan direkte sammenligning. Undersøgelser har derimod vist, at der kan identificeres fastlagte grænseflader mellem både de fysiske, de organisatoriske og de procesmæssige moduler. Dette er uafhængigt af byggeriets størrelse og udformning i øvrigt. Da svigt af både teknisk og procesmæssig art ofte opstår i grænsefladerne, må denne fastholdelse af grænseflader have været medvirkende til at reducere både teknisk og økonomisk risiko ved projekterne. Samtidig havde man inden for de forskellige moduler faste, fagligt baserede metoder med helt fastlagte principper for, hvordan de enkelte dele skulle udføres, og hvordan deres grænseflader skulle håndteres. Metoder, der var indlejret i de faglige traditioner, og som håndværkerne kendte, og som samtidig passede til det materiel og værktøj, der var til rådighed. Dette må, set i sin egen snævre kontekst, have givet en god produktivitet og en sikker gennemførelse.

lagttagelsen af det historiske byggeri viser en række forhold, som er relevante i forhold til at forstå og øge modulariseringen i nutidens byggeri. Et interessant forhold er, hvor tilbagetrukket en rolle standard- og modulmål spillede; særligt set i forhold til både den industrielle periode og optakten til denne. I det historiske byggeri var produktionen baseret på håndværk. Det har givet, hvad der i dag må betegnes som en cut-to-fit modularitet. Den har muliggjort den variation og individualitet, som manglede i det industrielle byggeri, hvor produktionsapparatet var gearret til masseproduktion af elementer med faste dimensioner. [Bertelsen, 1997]. Et andet forhold, der gjorde sig gældende, var, at grænsefladerne var stabile over en lang periode. Det forhold spiller godt sammen med nutidens ønsker om produktfamilier, hvor de enkelte moduler og grænseflader holdes stabile, også når slutproduktet ændres. I det historiske byggeri blev det fastholdt i så lang en periode, at det var fast indlejret i den faglige kultur. For at opnå det i dag er det ikke tilstrækkeligt, at det enkelte byggeri er modulariseret. Den samme modularitet skal gå igen på tværs af både projekter og tid.

## 5.2. Hvad er forskellen på, hvordan moduler indgår i produkter i produktionsindustrien og i en entreprenørvirksomhed?

De teorier, der er anvendt i arbejdet og gennemgået i teori afsnittet, dvs. Modular Function Deployment (MFD), Produkt Variant Master (PVM) og hele grundprincippet om Mass Customization, stammer fra produktionsindustrien og baserer sig på anvendelse af moduler. Der er i dette arbejde set på, hvordan moduler indgår i forskellige typer af produkter med det formål at skabe en forståelsesramme, der kan danne grundlag for den videre udvikling af moduler og konfigurerings i byggeriet. Arbejdet er ligeledes beskrevet i artiklen "Expanding the field of modularization with the introduction of the module application matrix", appendiks 2.

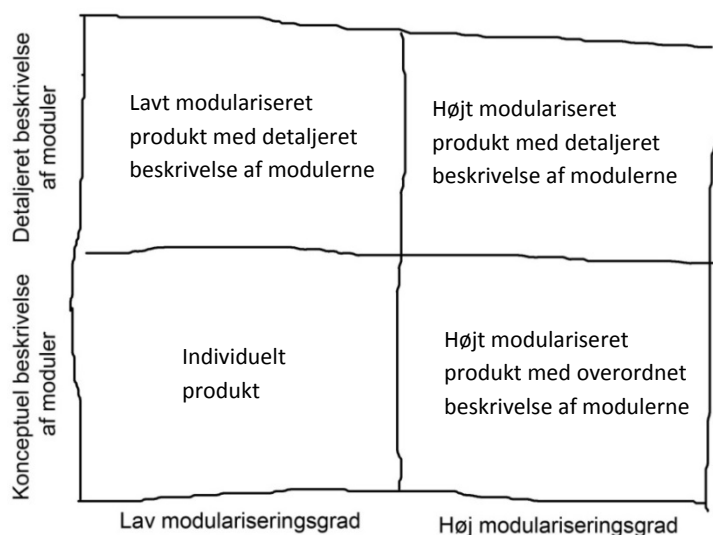
### Fuld eller delvis modularisering og detaljering

De i dette projekt anvendte teorier beskriver ikke eksplicit den grad af modularisering, der er i produkterne, ej heller færdiggørelsesgraden for de moduler, der indgår i produktet. Det samme gør sig gældende for hovedparten af de case beskrivelser, som ligger til grund for dette projekt. Eksempler på dette er porte [Hvam et al., 2007], American Power Conversion (APC) [Hvam, 2006, 2], elektrisk håndværktøj fra Black & Decker [Meyer & Lehnerd, 1997] og sko [Moser et al., 2006], [Sievänen, 2006], [Boër, 2006]. En undtagelse fra dette er beskrivelsen af FLS' cementfabrikker, [Hvam, 2006, 1], hvor det eksplicit nævnes, at der kun arbejdes med en overordnet beskrivelse af modulerne til brug ved tilbudsgivning. I "Arkitektur & Mass Customization" [Jørgensen, 2007] dækkes en delvis modularisering ved f.eks. at beskrive, hvordan Mass Customization anvendes på delelementer, eksempelvis systemlofter. Og meget eksplicit i Baldwin og Clark's artikel "Managing in an age of modularity" [Baldwin & Clark, 1997], hvor de skriver "Modularity is beneficial only if the partition is precise, unambiguous, and complete". Dette anføres dog uden at diskutere mulighederne ved en delvis modularisering eller en overordnet beskrivelse af modulerne.

Det rene fokus på produkter, alene bestående af fuldt dokumenterede moduler, er for snæver i forhold til byggeriet. Det ses af de øvrige arbejder, se bl.a. afsnit om trinvis implementering af moduler. Og at det skulle være den eneste rentable måde at anvende moduler på, modbevises entydigt i artiklen "Mass customization of process plants". [Hvam, 2006, 1]. Det er ikke dermed sagt, at en fuld modularisering af produktet og en meget detaljeret beskrivelse af modulerne, der gør det muligt at etablere produktionsgrundlaget alene ved at sammensætte modulerne, er en meget gunstig situation, men der fremstår ikke som den eneste måde at anvende moduler på. For at beskrive delvist modulariserede produkter eller delvist detaljerede moduler er der i dette projekt udviklet forståelsesrammen Module Application Matrix.

### Module Application Matrix

Module Application Matrix beskriver modularisering ud fra to parametre. Andel af moduler i slutproduktet og modulernes detaljeringsgrad. Der er tale om en generisk model, der ikke kun retter sig imod byggeprodukter, men mod enhver produkttype. Dog er der hovedfokus på ikke fuldt modulariserede produkter med ikke fuldt detaljerede moduler. Se Figur 16.



Figur 16 Module Application Matrix

Den modulariseringsteori, der ligger til grund for dette projekt, fokuserer, som tidligere beskrevet, på fuldt modulariserede produkter med fuldt detaljerede moduler. Sådanne produkter placerer sig i den øverste højre del af matrixen. Men lad os, inden vi begynder at indplacere produkter, se på de to parametre.

## Modulariseringsgrad

Den vandrette akse i matrixen beskriver andelen af moduler i slutproduktet. Produkters placering på denne akse afgøres ud fra en vurdering af, hvor stor en andel af produktet, der består af moduler, og hvor stor en andel, der består af individuelle komponenter. Her er det selvfølgelig oplagt at opstille en formel til at beregne denne andel. En sådan beregning kunne lyde:

$$\frac{\text{Andel af komponenter i moduler}}{\text{Totalt antal komponenter}} = \text{andel af moduler i slutproduktet}$$

For store produkter som eks. bygninger, vil det ikke umiddelbart være muligt at foretage en sådan beregning. Da matrixen samtidig er tænkt som en forståelsesramme, er det ikke fundet formålstjenligt at opstille en sådan eksakt definition. Det er da heller ikke den præcise placering i matrixen, der er afgørende, men derimod en vurdering af, hvor et produkt befinder sig, og hvor det er formålstjenligt at udvikle det hen.

På samme måde er der behov for at definere slutproduktet i forbindelse med en konkret anvendelse af matrixen. Matrixen skal anvendes til at vurdere produkter i en given virksomhed. Slutproduktet er således det produkt, som en given virksomhed leverer til sine kunder. Slutproduktet for en vinduesproducent vil eksempelvis være vinduet. Hvis det er fuldt eller næsten fuldt modulariseret, vil det placere sig i højre side af matrixen. Hvis vi ser på en entreprenørvirksomhed, kan slutproduktet være bygningen, og modulariseringsgraden skal vurderes på den baggrund. Hvis vi forestiller os, at entreprenøren anvender de førnævnte vinduer, vil de udgøre en lille andel af hans slutprodukt, bygningen. Hvis vi antager, at vinduerne er det eneste modul, der indgår i bygningen, vil dette slutprodukt skulle placeres i venstre side af matrixen. Hvis entreprenøren ikke anvender vinduet som et modul, men som en individuel komponent, skal bygningen placeres helt til venstre som ikke-modulariseret. Dette uagtet, at vinduet set fra vinduesproducenten er fuldt modulariseret.

## Detaljeringsgrad

Den lodrette akse i matrixen beskriver detaljeringsgraden, ikke for det samlede produkt, men for de moduler, der indgår i produktet. Et produkt, der hovedsageligt består af individuelle komponenter samt nogle få moduler med høj detaljeringsgrad, vil således placere sig i den øvre del af matrixen. Som for den vandrette akse er der ikke tale om en præcis beregning, men om en placering baseret på en vurdering af modulerne. Vurderingen foretages på det tidspunkt, hvor modulet inddrages i designet eller i konfigurationen. Dette til forskel fra afslutningen af design eller konfiguration, hvor detaljeringsgraden som minimum bør svare til fuldt produktionsgrundlag. Ved at vurdere på det tidspunkt, hvor modulet inddrages, ses der således på den grad af forberedelse, der ligger til grund for designet eller konfigurationen af et givet produkt.

Hvis modulerne i et produkt har forskellige detaljeringsgrader, og dermed forskellige grader af forberedthed, kan man vælge enten at vise det typiske eller gennemsnitlige detaljeringsniveau for modulerne, eller at vise detaljeringsniveauet for hvert modul.

## Beskrivelse af matrixens fire kvadranter

For at gøre det lettere at indplacere produkter i matrixen, vil dens fire kvadranter blive gennemgået.

### Helt individuelle produkter

Nederste venstre kvadrant indeholder produkter, der kan beskrives som fuldt skræddersyede. Produkterne er kendetegnet ved at indeholde meget få moduler, om nogen overhovedet. Samtidig er de moduler, der måtte være i produktet, meget løseligt beskrevet. Beskrivelserne varierer fra generelle normer og standarder, som DS, CEN og ISO til overordnede principløsninger.

Eksempler på virksomheder, der tidligere har været her, er Black & Decker [Meyer & Lehnerd, 1997] og American Power Conversion [Hvam, 2006, 2]. En del entreprenørvirksomheder befinder sig også her.

### Højt modulariserede produkter med løseligt beskrevne moduler

Den nederste højre kvadrant indeholder produkter, der har en høj andel af moduler, der er beskrevet på et konceptuelt niveau. I forbindelse med dette arbejde er FLS [Hvam, 2006, 1] det eneste eksempel, der er fundet på virksomheder i denne kvadrant. I visionen fremhæves FLS som et forbillede, som byggebranchen kan lære af. Denne kvadrant må derfor anses for at være relevant for entreprenørvirksomheder. Den ene halvdel af arbejdet med trinvis implementering har netop arbejdet med at definere byggerier på en måde, der vil placere dem i denne kvadrant. Se afsnit 5.3 "Hvilke metoder kan anvendes til at implementere moduler trinvis i en entreprenørvirksomhed?"

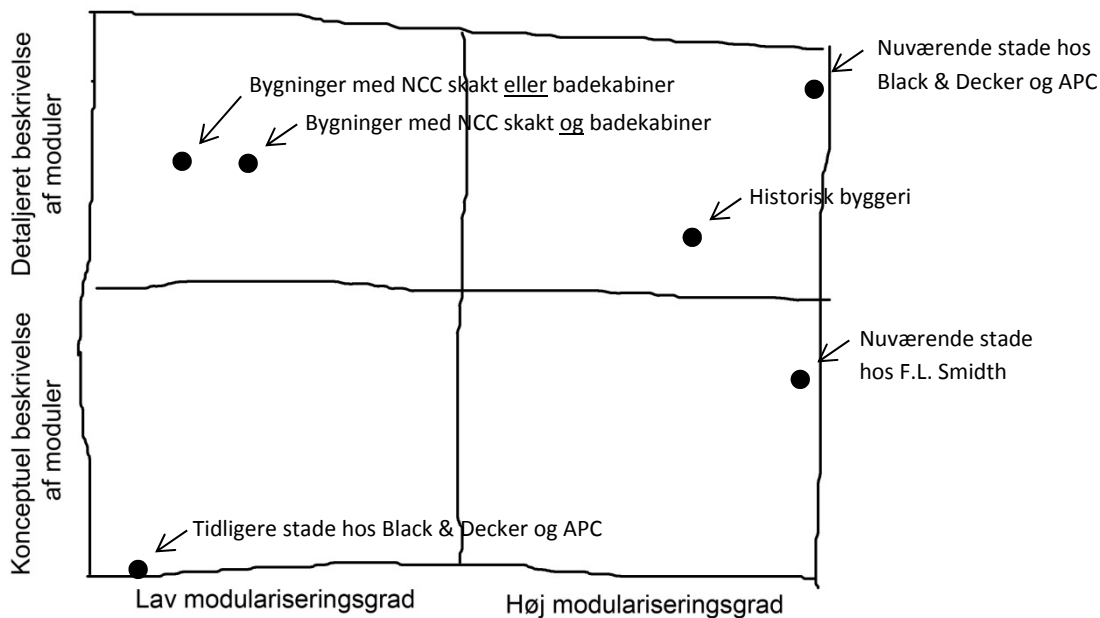
### Begrænset modularisering med detaljerede moduler

Den øverste venstre kvadrant indeholder produkter, der indeholder en lav andel af moduler, men hvor disse moduler har en høj grad af detaljering, dvs. i høj grad er færdigdesignet. Eksempler på produkter, der ligger her, er bygninger med enkelte moduler i form af eksempelvis badekabiner og NCC's præfabrikerede skakt. Den anden halvdel af arbejdet med trinvis modularisering har netop fokuseret på denne form for modularisering. Se afsnit 5.3 "Hvilke metoder kan anvendes til at implementere moduler trinvist i en entreprenørvirksomhed?" og Appendiks 4 Stepwise Modularization in the Construction Industry through a Bottom-Up Approach.

### Høj grad af modularisering og detaljering

Den øverste højre kvadrant indeholder de produkter, der er eller næsten er fuldt modulariserede, og hvor modulerne er detaljeret beskrevet. Den i dette projekt gennemgåede teori om Mass Customization og modularisering fokuserer på dette område og indeholder mange eksempler på, hvordan der kan opnås succes med en sådan strategi. Eksempler på dette er Black & Decker [Meyer & Lehnerd, 1997] og American Power Conversion [Hvam, 2006, 2], der har bevæget sig fra den nederste venstre kvadrant til det øverste højre hjørne, se Figur 17.

I artiklen "Expanding the field of modularization with the introduction of the module application matrix", afsnit "4. INDUSTRY APPLICATION", appendiks 2, gennemgås en række case-virksomheders placering i matrixen. Her vises alene indplaceringen af de beskrevne cases. Bemærk, at der for Black & Decker og APC både vises deres placering før og efter deres respektive udviklingsprojekter. For yderligere information henvises til artiklen "Expanding the field of modularization whit the introduction of the module application matrix", Appendiks 2.



Figur 17 Eksempler på placering af cases i MAM

## Besvarelse af spørgsmålet: Hvad er forskellen på, hvordan moduler indgår i produkter i produktionsindustrien og i en entreprenørvirksomhed?

Der er i dette arbejde fundet to betydende parametre i forhold til, hvordan moduler indgår i forskellige typer af produkter. Grad af modularisering og detaljeringniveau i modulerne. De to parametre er samlet i The Module Application Matrix og kan her bruges som en forståelsesramme, både i forhold til det aktuelle stadiet for et produkt, og i forhold til at forstå et produkts natur og udviklingspotentiale.

### Vurdering af pålidelighed

Undersøgelserne har fokuseret på meget forskellige brancher, fra traditionelle produktionsvirksomheder, hvor væsentlige dele af produktsortimentet er bygget op efter principperne om produktfamilier, over store procesanlæg med en modularisering baseret på overordnede beskrivelser, til etagebyggeri med en relativt begrænset modularisering. Herudover er resultaterne, med positiv respons, fremlagt for Steffen Nordahl Jørgensen Ph.D. fra Aalborg universitet. Med en baggrund fra produktionsindustrien har han arbejdet med modularisering af forholdsvis individuelle produkter i form af produktionsrobotter. SNJ ser The Module Application Matrix som en god forståelsesramme, der også kan bruges inden for hans felt. For yderligere information om SNJ's projekt henvises til "Developing Modular Manufacturing System Architectures" [Jørgensen 2013]. Flere af de cases, der er brugt til at udvikle og belyse The Module Application Matrix, stammer fra videnskabelige artikler skrevet af andre forskere.

Dette gælder for APC [Hvam, 2006, 2] og F.L. Smidth [Hvam, 2006, 1]. Black & Decker casen er baseret på bogen *The Power of Product Platforms*, [Meyer & Lehnerd, 1997], mens casene med historisk byggeri og NCC er baseret på arbejde udført i dette projekt.

## Detalldiskussion

Der er hverken fundet belæg for eller noget, der tyder på, at de to parametre er de eneste eller de væsentligste parametre i forhold til, hvordan moduler indgår i forskellige typer af produkter. De to parametre har dog vist sig væsentlige i forhold til forståelsen af produktmodularisering.

Samtidig er de beskrevne eller tilsvarende forhold ikke fundet omtalt i den litteratur, der ligger til grund for dette projekt. I litteraturen er hovedfokus lagt på fuld modularisering og en fuld eller høj grad af detaljering, dette i en så indforstået form, at de to forhold end ikke nævnes. Eneste undtagelse er i beskrivelsen af arbejdet med udviklingen af en konfigurator hos FLS [Hvam, 2006, 1], hvor der arbejdes med, hvad der betegnes som "base modules".

Citat: "... the configuration system only includes main functions in the cement factory defined as basic modules." [Hvam, 2006, 1].

Den kendsgerning, at de to forhold ikke tidligere er taget i betragtning, rejser en række spørgsmål, som der ikke er fundet svar på i den eksisterende teori. Væsentlige ubesvarede spørgsmål er: Hvordan skal modulers eksterne grænseflader håndteres, når modulet ikke interagerer med et kendt modul, men med et individuelt element i produktet? Hvornår vil man på traditionel vis kunne standardisere eller have en styret varians af sådanne eksterne grænseflader? Hvornår vil der være behov for at håndtere dette på en anden og mere individuel måde? Hvad er det i givet fald for en måde?

Vil man, i stedet for at fokusere på de eksterne grænseflader, skulle rette fokus mod de interne grænseflader? Dette er eksempelvis set i forhold til NCC's præfabrikerede skakt. Her var der fra starten kontrol med interne grænseflader, men i forhold til de brandtekniske forhold var der ikke nogen prædefineret løsning, når skakten blev anvendt sammen med præfabrikerede badekabiner. Det var NCC's oplevelse, at det stadig var en fordel at anvende skakten som ét modul med ukoordinerede grænseflader, sammenlignet med at have en lang række individuelle komponenter, der heller ikke var koordineret. En hypotese kunne således være: *"Det er bedre at have 500 ukoordinerede moduler i en bygning, end det er at have 50.000 ukoordinerede komponenter."* Der er ikke fundet svar på disse spørgsmål i litteraturen. Da erkendelsen først har udkrystalliseret sig i anden halvdel af dette projekt, har det ikke været muligt at besvare disse spørgsmål. De må overlades til efterfølgende arbejder og vil blive overdraget via afsnittet om fremtidig forskning i Del 6 Perspektivering og fremtidig forskning.

Den forståelsesramme, som The Module Application Matrix giver, kan være vigtig for virksomheder, der vil i gang med en modularisering af deres produkter. Her kan Module Application Matrix bruges til at indplacere produktets aktuelle stade, målet for modulariseringen og vise eventuelle mellemsteps. Denne mulighed retter sig særligt mod virksomheder, som ikke kan eller ønsker at gennemføre en fuld og detaljeret modulariseringen i et step.



### 5.3. Hvilke metoder kan anvendes til at implementere moduler trinvist i en entreprenørvirksomhed?

Som tidligere beskrevet er bygninger et så omfattende produkt med så stort behov for variation, at det både ud fra en ressource- og risikomæssig betragtning er de færreste virksomheder, der vil gå direkte efter en fuld modularisering af de bygninger, virksomheden producerer. I "The Long Tail and Innovation of New Construction Practices – Learning Points from Two Case Studies" [Thuesen & Jonsson, 2009] tales der om radikal innovation, eksemplificeret ved NCC Komplett™, og trinvis (incremental) innovation, eksemplificeret ved NCC's Tyske platform. Artiklen beskriver, hvordan NCC har opnået langt større succes med den trinvis innovation end med den radikale, og en NCC medarbejder citeres for følgende udtalelse:

"If you want to learn to jump four meters in pole vaulting you don't put the bar at four meters in the first jump. You need to start at small heights and then gradually heighten the bar". [Thuesen & Jonsson, 2009].

The Module Application Matrix har bidraget til forståelsen af ikke fuldt modulariserede produkter og ikke fuldt detaljerede moduler. Der har igennem projektet været en række samtaler med personer med byggebaggrund. Her har der været en anden opfattelse af, hvad der menes med modulariserede byggerier. Der har simpelthen været tale om et lavere ambitionsniveau. Dette til trods for, at den anvendte sprogbrug stort set har været den samme som den, der anvendes inden for produktionsindustrien, herunder inden for modulariserings- og Mass Customization teorien. Man har "talt forbi hinanden". Ved at anvende The Module Application Matrix er denne forskel blevet tydelig.

For virksomheder, hvor det ikke er åbenlyst, at et givet produkt skal modulariseres fuldt ud med detaljerede moduler, jf. den traditionelle modulariserings- og Mass Customisation teori, kan The Module Application Matrix anvendes. Virksomheden skal reflektere over og prioritere udviklingsretningen for sine produkter. Ved både at indplacere produktets nuværende stade og målet for en given udvikling, rejser der sig forskellige spørgsmål i forhold til de to akser – spørgsmål, hvis svar kan indgå i prioritering og scoping af virksomhedens udviklingsprojekter. Det kan være spørgsmål som de følgende:

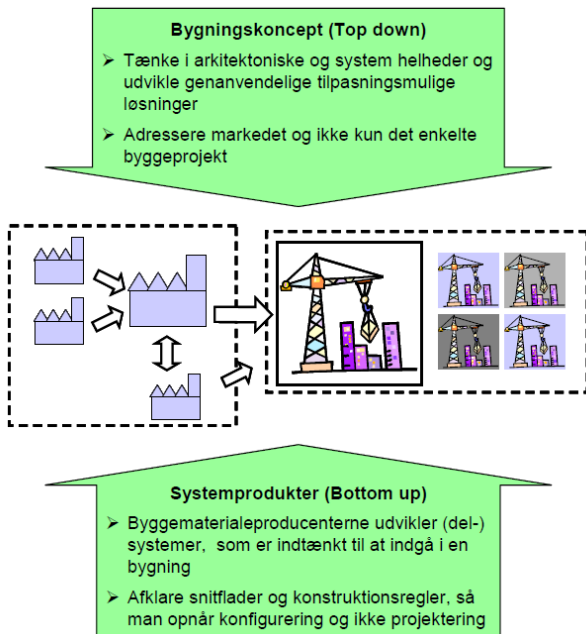
#### Grad af modularisering

- Tekniske muligheder - Hvilke dele af produktet kan udformes på en måde, der gør det muligt at etablere det som et modul?
- Markedsmæssige muligheder - Hvor ofte efterspørger kunderne forskellige dele af produktet og i hvilke varianter?
- Ressourcemæssige muligheder – Hvor store dele af produktet har virksomheden ressourcer til at udvikle og vedligeholde som moduler?

#### Detaljeringsniveau

- Tekniske muligheder – I hvilket omfang varierer de tekniske krav, og i hvilket omfang er det muligt at definere ensartede løsninger, der opfylder kravene?
- Markedsmæssige muligheder – Hvor stor en omsætning forventes der af et givet modul, og hvilken detaljering er rentabelt, når den sammenholdes med behovet for variation?
- Hvilket forhold mellem detaljering og abstraktion vil give mulighed for at besvare markedets krav med ensartede løsninger?
- Ressourcemæssige muligheder – Hvilken detaljeringsgrad har virksomheden ressourcer til at udvikle og vedligeholde, hvor bør der startes, og hvor bør der sluttes?

I forhold til den del af innovationen, der handler om modularisering og brug af konfigureringsystemer, er der i dette projekt gennemført to arbejder, der tager udgangspunkt i henholdsvis en Top-down og en Bottom-up tilgang, se Figur 18. Det ene arbejde tager udgangspunkt i erfaringerne fra FLS [Hvam, 2006, 1]. Her er der med en top-down tilgang udviklet en Produkt Variant Master (PVM) og en prototype konfigurator for kontor og boligbyggeri med udgangspunkt i NCC's konceptbyggerier. Dette arbejde er også beskrevet i artiklen "Modularization in the Construction Industry through a Top-Down Approach", appendiks 3. Det andet arbejde tager udgangspunkt i en bottom-up tilgang og beskriver to cases fra den danske byggebranche, henholdsvis Altan.dk og NCC's præfabrikerede skakt. Disse cases er også beskrevet i artiklen "Stepwise Modularization in the Construction Industry through a Bottom-Up Approach", Appendiks 4.



Figur 18 Top-down og Bottom-up tilgang [Mikkelsen et al., 2005]

I de følgende afsnit vil de to arbejder blive gennemgået, hvorefter afsnittets hovedspørgsmål vil blive besvaret.

## Trinvis implementering baseret på en top-down tilgang

Dette arbejde baserer sig på hypotesen om, at bygninger er sammenlignelige med industrielle procesanlæg som cementfabrikker, og at det, som det er set hos FLS, er hensigtsmæssigt at konfigurere bygninger på et overordnet niveau fremfor at medtage alle detaljer i produktet. FLS har således beskrevet deres produktprogram på et konceptuelt niveau. Det har gjort det muligt for FLS at udarbejde tilbud til kunden, uden først at skulle detaildesigne og koordinere fabrikens delkomponenter/moduler. Det har resulteret i, at FLS kan udarbejde tilbud langt hurtigere, både i forhold til kalender- og mandetid. De udarbejdede tilbud anvender FLS' foretrukne løsninger. [Koch & Jensen, 2007]. I forhold til byggebranchen er målet, at der i dialogen med kunden kan tages udgangspunkt i en række prædefinerede løsninger og metoder, fremfor at starte fra bunden i hvert nyt byggeprojekt.

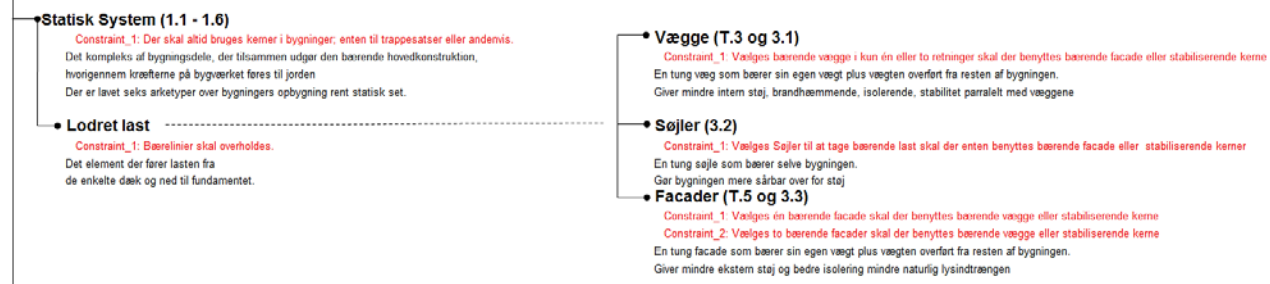
Gennem projektet er der interviewet og afholdt workshops med en række personer i NCC med de formål at indsamle information og løbende tilpasse funktionaliteten og indholdet af den udviklede PVM og det udviklede konfigureringssystem. Den etablerede PVM adskiller sig fra den generelle teori på dette område ved kun at indeholde customer og engineering view. Det er en naturlig konsekvens af, at der arbejdes på et konceptuelt niveau, hvor målet er at kontrollere det overordnede løsningsvalg svarende til Engineering view.

Projektet har været afgrænset til bolig- og kontorbyggeri, og ligesom for denne afhandling i øvrigt har der været tale om etagebyggeri, i dette tilfælde et meget specifikt etagebyggeri over tre etager. I de kommende afsnit gives en kort beskrivelse af nogle af de områder, der er indsamlet information inden for. Informationen er efterfølgende struktureret i en PVM, hvoraf der i Figur 19 kan ses et udsnit.

## Customer view



## Engineering View



Figur 19 Udsnit af PVM for bolig- og kontorbyggeri hos NCC

### Installationer

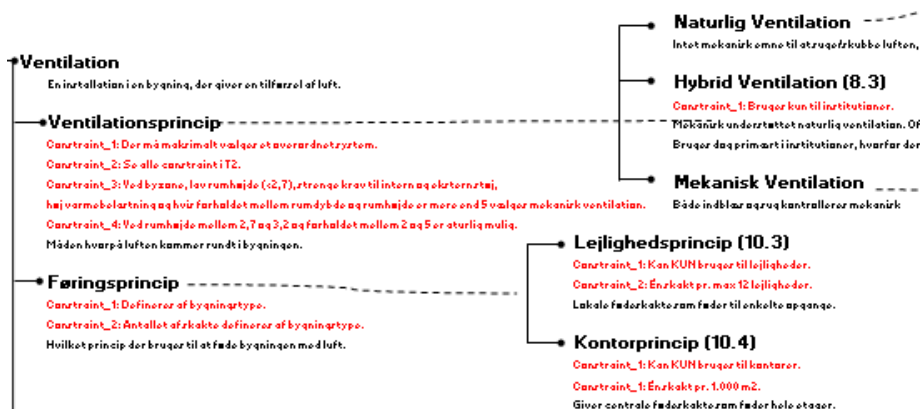
For installationerne skal der vælges mellem forskellige løsninger indenfor brugsvand, afløb, EL, varme og ventilation. De forskellige dele har dog ikke fået samme fokus. Det hænger sammen med, at der er stor forskel på både omkostninger og pladsforbrug for de forskellige installationer. På den baggrund har særligt ventilation fået meget fokus. Dernæst følger varme, som har stor betydning i forhold til energiforbruget. Vand og afløb har fået meget begrænset fokus, da det sjældent giver anledning til de store problemer, når bare installationerne er placeret tæt på skakten. Af de medtagne installationer har EL fået mindst fokus.

For ventilationen skal der træffes valg f.eks. som disse: Om der skal anvendes et naturligt, mekanisk eller et hybridt system, se Figur 20. Om luften skal føres rundt i rektangulære eller cirkulære kanaler. Om genvindingen af luften skal foregå ved et rotorsystem, kryds/modstandsprincip eller vha. væskekoblede batterier. Alt dette har indflydelse på omkostninger, plads og renhed af luften.

For de elektriske installationer skal der besluttes, om der skal føres i loft eller gulv samt hvilken form for interface, brugeren skal have til strømudtag: En boks i gulvet, en kanal fra loftet eller en skinne på væggen.

Varmeforsyningen kan komme på flere måder: Fjernvarme, naturgas, varmepumper eller en form for vedvarende energi. Ved nybyggeri bruges der generelt fjernvarme eller naturgas som primær varmforsyning, eventuelt suppleret med vedvarende energi. Desuden skal der ved fjernvarme tages stilling til, om overførslen skal komme direkte eller indirekte. Ved det direkte system er varmeledningen ført direkte ind i radiatorer osv. før den returneres til kraftværket. Ved indirekte overførsel, føres varmen fra varmeledningen igennem en varmeveksler til et lukket system, der pumper rundt i radiatorerne. Dette er normalt lokalt bestemt.

For brugsvand er der to ting, der skal tages stilling til: Om opvarmningen af brugsvandet skal ske via en varmtvandsbeholder eller en varmeveksler – som regel lokal bestemt. Om indføring og opvarmning: For indføring skal det besluttes, om der skal være afbrudt eller uafbrudt forsyning, hvor et afbrudt system forhindrer tilbageløb. Dette bruges dog primært, hvis der er miljømæssige problemer ved et sådant tilbageløb. Derfor bruges der primært uafbrudt indføring i Danmark.



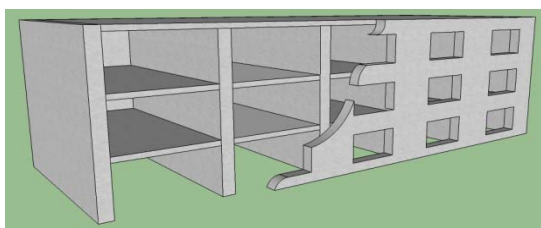
Figur 20 Udsnit af Engineering View for installationer

### Statisk system/råhus

Selv om det statiske system i de fleste byggerier er en kombination af forskellige principper, er det lykkedes at opstille seks arketyper for det statiske system i Engineering view. Arketyperne er på traditionel vis koblet til customer view, hvor fokus er på bygningens fleksibilitet i forhold til henholdsvis facader og arealer.

Beskrivelse af de seks arketyper:

#### Arketype 1

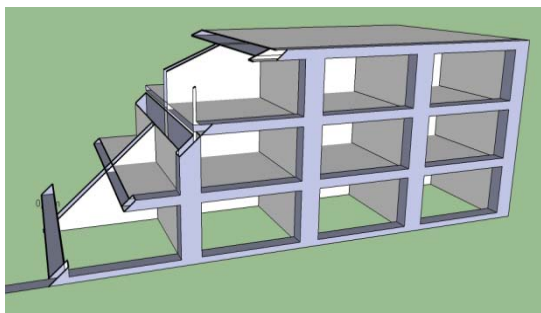


Figur 21 Arketype 1 Bærende vægge og bærende facader

Ved *bærende vægge og bærende facader* er bygningen opdelt i mange rum adskilt af bærende vægge. Dette gør at, fleksibiliteten af bygningen er ret lav. Alle vægge og facader fungerer som et bærende element og kan derfor ikke undværes. Bygningen bliver kompakt og behøver ingen yderligere stabiliserende elementer, da bygningen stabiliserer sig selv.

Se Figur 21.

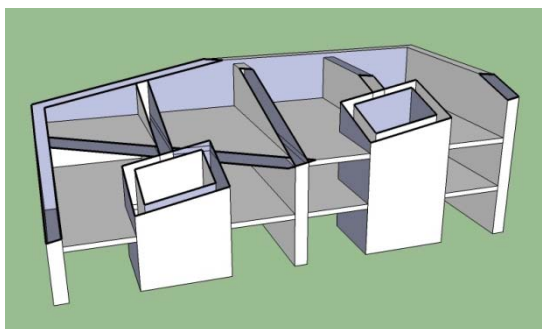
#### Arketype 2



Figur 22 Arketype 2 Bærende vægge og lette facader

*Bærende vægge og lette facade* giver bygningen en større fleksibilitet i udformningen af facaden, men stiller samtidig nogle krav til de bærende vægge, som er placeret inde i bygningen. En regel, der sættes i kraft ved valg af denne arketype er, at der skal være tre bærende vægge, som står på hver deres væglinje, hvoraf kun to af dem må være parallelle. Samtidig må de tre vægge ikke skære hinanden i ét punkt. Overholdes dette, behøves der ikke flere stabiliserende elementer, da væggene tager alle kræfter. Bygningens indretning gøres ved denne løsning ret uflexibel, men den giver gode muligheder for fleksibilitet i facaden. Se Figur 22.

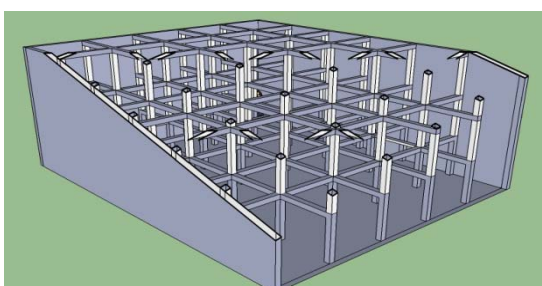
### Arketype 3



Figur 23 Arketype 3 Bærende vægge og kerner

Med *bærende vægge og kerner* fås en konstruktion, som er selvbærende og stabiliserende. Denne opbygning kan da enten være som førstnævnte, med tunge facader, eller med lette facader. I selve bygningen vil der være tværgående vægge til at holde bygningen stående og kerner omkring trappeskakte til at afstive bygningen. Denne form for konstruktion ses primært anvendt ved lejlighedsbyggeri. Se Figur 23.

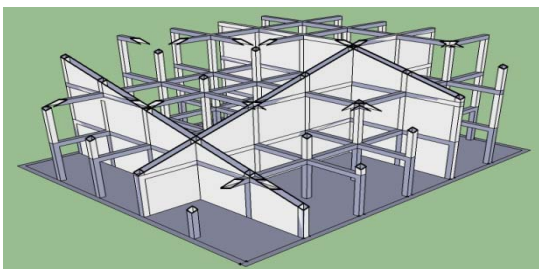
### Arketype 4



Figur 24 Arketype 4 Bærende facader og søjle-bjælke-system

Som en kontrast til de foregående eksempler findes *bærende facader og søjle-bjælke-system*. Denne form for konstruktion giver en fleksibel indre opbygning, hvor søjler tager sig af den lodrette last. Herudover er der brug for et stabiliserende element, hvilket facaderne leverer, når de er placeret i mindst tre væglinjer, hvoraf højst to er parallelle. Dette princip bruges som regel til lagerbygninger. Se Figur 24.

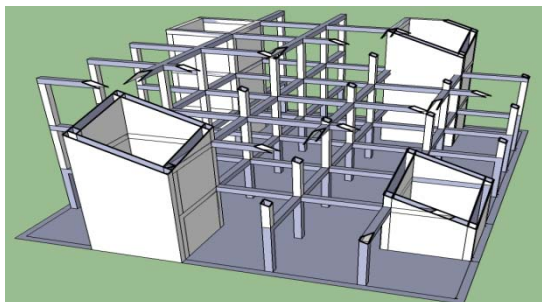
### Arketype 5



Figur 25 Arketype 5 Bærende vægge og søjler

Princippet med *bærende vægge og søjler* minder om det ovenstående princip, dog med nogle forskelle. Ved dette princip tages noget af fleksibiliteten i selve bygningen og gives til en større fleksibilitet i facaden. Det sker ved at gøre facaden til en let konstruktion, hvorved der skal bruges nogle afstivende elementer inde i bygningen. De fås ved at indføre nogle bærende vægge. Se Figur 25.

### Arketype 6



Figur 26 Arketype 6 Bærende søjler og kerner

Ved *bærende søjler og kerner* kan der bruges en let og dermed fleksibel facade samtidig med, at der ikke er bærende vægge. I stedet anvendes stabiliserende kerner og søjle-bjælke-system. Kerner er normalt placeret rundt om trappe- eller installationskakte. Denne form for konstruktion bruges som regel ved kontorbyggeri og giver en stor grad af fleksibilitet, da der opnås store åbne områder mellem kernerne. Da der grundet brandsikkerhed og trappeskakte altid skal være kerner i etagebyggerier, er denne løsning ofte anvendt. Se Figur 26.

## Bygningshøjde

Et lille element, som er medtaget i konfiguratoren, er en simpel beregning af bygningshøjden. Den kan på et tidligt tidspunkt bruges til at optimere bygningshøjden i forhold til lokalplanen. Selv om det er de samme elementer, der indgår, arbejdes med to forskellige formler, én for kontorer og én for boliger. De to løsninger afspejler forskellige traditioner på de to områder, hhv. afstand fra færdiggulv til færdiggulv og afstand fra færdiggulv til loft. Samtidig gør opdelingen det muligt at fastholde en række parametre, såsom rumhøjde og isolering. Det er parametre, der ofte kan fastholdes inden for samme bygningstype, men som varierer på tværs af bygningstyper.

Beregningen foretages ud fra følgende formel:

$$\text{Bygningshøjde} = Y + \sum_{X=0}^X (R + N(Q, V) + D + G(Q)) + I + T + K$$

Parametrene kan ses i Tabel 7, og de er illustreret i Figur 27.

**Tabel 7 Parametre til beregning af bygningshøjde**

Parametre	Notation
Etageantal	X
Tagkrone	K
Tagpap	T
Isolering	I
Dæktykkelse	D
Nedsænket loft	N
Ventilation	V
Rumhøjde	R
Installationer (uden ventilation)	Q
Gulvopbygning	G
Sokkel	Y



**Figur 27 Illustration til beregning af bygningshøjde**

## Energiforbrug

Det konceptuelle niveau er ikke tilstrækkeligt til at foretage detaljerede energiberegninger og -simuleringer. I stedet er der indlagt en række anbefalinger, tommefingerregler og typiske værdier for bygningens forskellige dele. Tykkelsen på facader og tag er inddraget som en del af anbefalingerne. Det er muligt at bestemme tykkelsen af de forskellige bygningsdele og derefter få oplyst u-værdien for den enkelte bygningsdel. Dette blev gjort med henblik på, at det så tidligt som muligt skulle være muligt for arkitekter – ud fra et energihensyn – at tegne en brugbar og realistisk model af en ny bygning, og dermed reducere behovet for efterfølgende iterationer.

## Økonomi

Med det formål at kunne kalkulere omkostningerne ved at realisere projektets er der medtaget en række centrale elementer, som facader, bygningsgeometri og installationer. Det er ikke tilstrækkeligt til at kunne foretage en fuldstændig kalkulation af projektets omkostninger. I stedet er der opstillet en omkostningsrammeramme med typiske prisestimer for forskellige dele. For tidligt at skabe en bevidsthed om projektets omkostninger og ambitionsniveau kan der i forhold til eks. bygningsgeometri og aptering vælges høj, middel eller lav, med dertil hørende omkostnings oversalg. Se Figur 28.

**Ydre Dimensioner og Økonomi**

**Ydre dimensioner**

Forventet etageareal, uden kælder og parkering. [m<sup>2</sup>):

Antal etager:

Ønsker du at tage stilling til parametre vedrørende prisen på geometri, facade og aptering?

**Økonomiske konsekvenser**

Hvilken geometrisk kompleksitet skal bygningen have?

Der kan regnes med at en mere kompleks geometri er dyrere end en simpel geometri. Eksempler: Horten (Kompleks), Saxo bank (Mellem), NNIT (Simpel). Ved valg af simpel geometri regnes det med at korrigerede rør ikke er nødvendigt.

Omkostningerne vil på baggrund af den valgte kompleksitet for geometri påvirke bygningen med en faktor: 1

Hvilket prisniveau ønskes det at facaden har?

Der er flere parametre der påvirker prisen på facaden, eks.: Tolerancekrav, kompleksitet, materiale, placering, ophæng, antal m<sup>2</sup>, mv.

Prisen/m<sup>2</sup> for facaden kan estimeres til [DKK]: 5000

Den samlede pris for facaden vil være omkring [TDKK]: 20000

Hvilket prisniveau ønskes det at apteringen har?

Der er flere forskellige former for komplettering/aptering som skal medregnes, her tænkes: Vinduer, gulv, indvendige skillevægge, glasvægge, mv.

Prisen/m<sup>2</sup> for aptering kan estimeres til [DKK]: 7000

Den samlede pris for aptering vil være omkring [TDKK]: 28000

Obs. det skal huskes at der skal bruges penge til overfladebehandlingen. (maling osv.)

Figur 28 Skærmprent fra konfigurator. Bygningens ydre dimension og økonomi overslag

### Konfigureringsystemet

Konfiguratoren er opbygget, så de områder, der spørges til, bevæger sig udefra og ind mod bygningens kerne. De første spørgsmål retter sig således mod lokalplanen for det område, hvor byggeriet skal opføres. Herefter spørges til bygningstypen, og de sidste spørgsmål omhandler indre dele som f.eks. ventilation. Konfiguratoren har til en vis grad karakter af en tjekliste, som skal sikre, at der tages stilling til de rigtige ting, eller at der bevidst ikke tages stilling til et givet punkt. Dette håndteres ved, at brugeren konfigurerer konfiguratoren og vælger hvilke spørgsmål, der ønskes svar på.

**Beregning af dimensioner for klimaskærmen**

**Dimensionering af tag og facader**

**Beregning af tagets tykkelse [m] og lambda [W/m K]**

De nedestående værdier for hhv. lambda, samt tykkelser på dele af tag og mur, kan bruges som standardværdier, hvis mere præcise værdier ikke kendes.

Ønsker du at beregne u-værdien for taget?

Tykkelse af huldaek [m]:

Lambda for huldaek [W/mK]:

Tykkelse af isolering [m]:

Lambda for isolering [W/mK]:

Resulterende u-værdi [W/m<sup>2</sup>K]: 0.104

Samlet tykkelse af tag [m]: 0.580

Figur 29 Dimensioner for klimaskærmen

I Figur 29 og Figur 30 vises et udsnit af konfigureringsystemet. Her har brugeren mulighed for at indtaste dimensioner og isoleringsværdier for forskellige bygningsdele. For en række områder er der præindtastede værdier, der er typiske for det pågældende område. Der er ligeledes en hjælpe-tekst, der skal hjælpe brugeren til at forstå baggrunden for værdierne. Brugeren kan vælge, om den præindtastede værdi ønskes opretholdt, eller om han selv vil indtaste en værdi.

#### Anbefalinger til u-værdier [W/m<sup>2</sup> K]:

Facade og kældervægge mod jord	0.15
Terrændæk, kældergulve mod jord og etageadskillelser over det fri eller ventileret krybberum	0.1
Loft- og tagkonstruktioner, herunder skunkvægge, flade tage og skråvægge direkte mod tag	0.1
Vinduer herunder glasvægge, yderdøre, porte og lemme mod det fri	1.4
Ovenlysvinduer og ovenlyskupler	1.7

For vinduer og døre vil u-værdier normalt kunne findes på forhandlerens hjemmeside. Alternativt kan forskellige u-værdier findes og beregnes på fx Velux's hjemmeside: [http://www.velux.dk/private/raad\\_og\\_beregnere/beregnere/u-vaerdier](http://www.velux.dk/private/raad_og_beregnere/beregnere/u-vaerdier).  
I tag bruges normalt 300mm Sondolitt s60 med  $\lambda=0.041$  eller s80 med  $\lambda=0.038$  + 25mm brandisolering typisk Rockwool.

#### Figur 30 U-værdier for klimaskærmen

##### Evaluering af hypotesen

Det etablerede konfigureringsystem baserer sig på erfaringerne fra FLS og har overordnet set til formål at reducere ressource- og tidsforbrug særligt ved tilbudsgivningen. Derudover er der det, i forhold til dette projekt meget vigtige, formål at understøtte anvendelsen af moduler i NCC's byggerier gennem en trinvis implementering. Evalueringen er foretaget på baggrund af arbejdet med at udvikle prototype konfiguratoren, og den er baseret på dialogen med inputgiverne fra NCC. Hypotesen er afprøvet ved at sammenholde dette med erfaringerne fra FLS, som de er beskrevet i artiklen "Mass customization of process plants". [Hvam, 2006, 1].

Tabel 8 Sammenligning af effekter hos FLS og NCC

Effekt	FLS	NCC
Tidsforbrug tilbudsgivning	Væsentlig reduktion	Væsentlig reduktion
Ressourceforbrug tilbudsgivning	Reduktion på 50 %	Nogen reduktion
Kvalitet af tilbuddet	Mere homogene tilbud af højere kvalitet	Mere homogene tilbud af højere kvalitet
Strukturerede processer	Mere strukturerede processer med mindre risiko	Mere strukturerede processer med mindre risiko
Synliggørelse af konsekvenser af beslutninger	Konsekvenser af kundens valg bliver tydeligere	Konsekvenser af kundens valg bliver tydeligere
Modularisering og genbrug af løsninger	Kraftig forbedring	Lille forbedring

Af Tabel 8 kan det ses, at der, som det også er set hos FLS, er et stort potentiale for at optimere tilbudsgivningen hos NCC. Ved at anvende et konfigureringsystem har det vist sig muligt at øge vidensniveauet i den tidlige fase af et byggeri og i en vis udstrækning at sammensmelte ide-, skitse- og forprojektfaserne. Dette bliver muligt, fordi viden er samlet i konfigureringsystemet og dermed kan inddrages, uden at der etableres en projektor-organisation med en stor kreds af personer med specialkompetencer. Alle de interviewede fag har netop ytret ønske om, at der tidligt i projektet inddrages viden fra deres fag, dels for at reducere behovet for iterationer og dels for at undgå, at der senere i projektet må vælges mindre optimale løsninger. De forskellige fag udtrykte stor interesse for, på en overskuelig måde, at kunne få overblik over de væsentligste forhold, der skal tages hensyn til i forhold til øvrige fag. Når man betragtede sit eget fag, var der dog en klar tendens til at mene, at de indlagte oplysninger var udtryk for kraftige generaliseringer, og at de var for overordnede til for alvor at kunne være til nytte.

I forhold til udbredelsen af moduler bærer resultatet noget præg af, at NCC i dag kun har et meget begrænset antal moduler. Eksemplet med de seks arketyper for statiske systemer viser dog, at et konfigureringsystem ville kunne bruges til at udbrede anvendelsen af moduler. Det viser dog også, at det har været vanskeligt for alvor at reducere variansen. Det hænger bl.a. sammen med, at mange forskellige elementer/potentielle moduler samvirker om at give byggeriet dets egenskaber. Et yderligere eksempel ses i forhold til energirammen. Her var der tidligere krav om, at de enkelte bygningsdele skulle have en givet u-værdi, hvor kravet i dag retter sig mod hele bygningen. Samtidig vil et modul som eksempelvis facader have stor indflydelse på flere ellers uafhængige områder, f.eks. energiramme og arkitektonisk udtryk.

Samlet set er der således nogle hurdle i at implementere et konfigureringsystem i en entreprenørvirksomhed - hurdle man ikke ser hos FLS, hvor produktet er langt mere rationelt i sin struktur og funktion. På trods af dette må implementeringen af et konfigureringsystem anses for givende set ud fra de gevinst, der ligger i forhold til tid, ressourceforbrug og risiko. Samtidig vil udvikling og anvendelse af et konfigureringsystem spille godt sammen med udvikling af yderligere moduler.



## Trinvis implementering baseret på en bottom-up tilgang

Et alternativ til den top-down tilgang, der er beskrevet i foregående afsnit, er en bottom-up tilgang, hvor der vælges enkelte dele af byggeriet, som modulariseres. Der er i dette projekt ikke arbejdet med at udvikle nye løsninger af denne type, men som beskrevet i afsnit 5.2 Hvordan kan konfigureringsystemer anvendes i en entreprenørvirksomhed? er der arbejdet med at udvikle konfigureringsystemer til NCC's præfabrikerede skakt. Netop NCC's præfabrikerede skakt er et eksempel på en bottom-up løsning. I artiklen Stepwise Modularization in the Construction Industry through a Bottom-Up Approach, Appendix 4 gives eksempler på sådanne løsninger, i form af Altan.dk og NCC's præfabrikerede skakt. Sidstnævnte er også beskrevet i afsnit 5.4 Hvordan kan konfigureringsystemer anvendes i en entreprenørvirksomhed? På den baggrund vil fokus i dette afsnit blive lagt på de dele, som ikke tidligere er beskrevet.

### Altan.dk

Altan.dk er en virksomhed, der, som navnet fortæller, producere altaner. Virksomheden er vokset ud af en mindre, traditionel entreprenørvirksomhed, Ringsted Bygningsentreprise. Med støtte fra Realdania startede de et modulariseringsprojekt med det formål at udvikle altaner som systemleverancer. De så et marked, hvor de kunne levere kundetilpassede altaner af høj kvalitet til attraktive priser, rettet både mod eksisterende bygninger og nybyggeri. Det blev en succes, og i oktober 2006 blev Altan.dk etableret som en selvstændig virksomhed med altaner som deres veldefinerede produkt. [Byggeriets Innovation, 2007].

De har anvendt en bottom-up tilgang til modularisering af bygninger og har udvalgt en enkelt bygningsdel, hvis produktion og montage, de har standardiseret. Altaner er et sammensat produkt som hos Altan.dk er standardiseret ved særligt at fokusere på produktets interne grænseflader. Dette er baseret på, at de eksterne elementer ikke på samme måde som de interne kan kontrolleres. Derfor må grænsefladen til de eksterne også kunne klare en større individualitet. Altan.dk har ikke kun fokuseret på de fysiske dele af produktet, men på hele processen – herunder på det materiel, der skal bruges ved montagen, samt på kundeservice og support gennem hele produktets livscyklus. Altan.dk producerer ikke selv de dele, der indgår i deres altaner, men de udfører selv designet og indhandler de enkelte dele, der indgår i altanen. Selve montagen af de over 2.000 årligt solgte altaner, foretages alene af Altan.dk's specialuddannede montører.



Figur 31 En af Altan.dk's altaner [Byggeriets Innovation, 2007]

I starten af udviklingsprocessen blev der samlet en tværfaglig gruppe bestående af specialister fra Ringsted Bygningsentreprise, senere Altan.dk, statiske eksperter fra det rådgivende ingeniørfirma Bascon, eksperter og leverandører af konfigureringssoftware fra 3D Facto, produkt- og produktfamilieudviklingskonsulenter fra Institutet for Produktudvikling (IPU) og to leverandører, Kecon og Weland, der leverer henholdsvis stål- og aluminiumsløsninger. For at få kontrol over deres produktfamilie har de udarbejdet en PVM, hvis informationer, sammen med en række andre, er samlet i et konfigureringsystem. Et af hovedfokusområderne under udviklingsarbejdet var at reducere og kontrollere varians. Ved at bruge PVM blev altanerne delt ind i to hovedgrupper, aluminium og stål. Antallet af hulstørrelser i aluminiumsdelene blev reduceret fra 23 til fire, og antallet af farver blev reduceret fra omkring 40 til ti. De ti farver vurderes at tilfredsstille 90 % af markedet. For at sikre, at reduktionerne ikke afskar centrale dele af markedet, blev de baseret på en række kundeundersøgelser.

Udover at sikre den rette varians i produktet betød kundeundersøgelserne, at virksomhedens mindset blev vendt 180 grader; fra en ingeniørtilgang, hvor altanen blev betragtet som en bygningsdel monteret på en bygning, til et brugerperspektiv, hvor altanen blev set som en udvidelse af hjemmet. Ændringen er meget tydelig i virksomhedens salgsmateriale. Tidligere var næsten alle billeder taget udefra, visende "huse med altaner", mens næsten alle billeder i dag er taget indefra, visende adgangen til udendørsarealet på altanen. [Byggeriets Innovation, 2007].

## NCC skakt

Fra 2006 til 2008 udviklede NCC en præfabrikeret og konfigurerbar installationsskakt sammen med RH ARKITEKTER AS og Valcon Innovation A/S, se Figur 32. Skakten sælges i dag til projekter, både til NCC's egne projekter og til projekter uden for NCC. Gennem en bottom-up tilgang bliver installationsskakte, der traditionelt produceres in situ af mange forskellige parter, nu monteret som en samlet systemleverance. Udviklingen blev støttet af Realdania, en støtte, der var meget vigtig, da entreprenører, i modsætning til produktionsindustrien, ikke har tradition for langsigtet produktudvikling.

Skakten blev valgt frem for andre bygningsdele, fordi den indeholder en forholdsvis høj værdiskabelse på en begrænset plads. Samtidig er det en del, de færreste kunder interessere sig for, under forudsætning af at den virker. Dermed medvirker kundepræferencer kun indirekte på variansen, og man får et meget rationelt produkt, som vi også har set det med FLS' cementfabrikker.

NCC har gennemført en undersøgelse, der viser, at i opbygningen af en traditionel skakt udføres over 300 arbejdsoperationer, fordelt på ni forskellige fag. Det sker på et areal af størrelsesordenen 600x800 mm med kun én adgangsvej og med håbløse arbejdsstillinger. [Byggeriets Innovation, 2008].

Målet med skaktprojektet var at skabe en modulær, præfabrikeret skakt, der kan konfigureres, så den passer ind i næsten enhver etageboligbebyggelse. Det første, der blev gjort i udviklingen, var at undersøge allerede gennemførte byggeprojekter, for dermed at klarlægge kravene til skakten. På den baggrund blev der beskrevet 24 arketype af lejlighedsindretninger og syv arketyper af badeværelser. Baseret på arketyperne blev der udviklet tre forskellige skakt udformninger, hvoraf to af dem ville kunne dække 80 % af arketyperne.

Med den tredje kunne dækningen bringes op på 95 % af arketyperne. [Byggeriets Innovation, 2008].



Figur 32 NCC skakten

Eksterne konsulenter med erfaring i at definere moduler i produktionsindustrien var inddraget i projektet. Med disse konsulenter fulgte også arbejdsmetoder, der normalt anvendes i produktionsindustrien. En af disse metoder var PVM, der blev brugt til at samle både kundekrav, de tekniske løsninger og de enkelte komponenter. [Byggeriets Innovation, 2008].

### Effekter begge virksomheder

Altan.dk og NCC har begge trinvist implementeret moduler baseret på en bottom-up approach. Den trinvis implementering har givet begge virksomheder projekter af en størrelse, de har kunnet styre. Begge virksomheder har oplevet en ændring i den måde, hvorpå deres organisationer arbejder med de respektive moduler. Processerne er blevet mere strømlinede, og med den veldefinerede produktstruktur har de opnået et langt bedre overblik over deres produkter.

Det er mere synligt hos Altan.dk, end det er hos NCC. Det hænger sammen med, at udviklingen hos Altan.dk omfatter hele deres produkt, mens det hos NCC kun er en lille delmængde af det, virksomheden producerer.

## Besvarelse af spørgsmålet: Hvilke metoder kan anvendes til at implementere moduler trinvist i en entreprenørvirksomhed?

Der er i dette projekt set to strategier, som en virksomhed kan vælge til trinvist at implementere moduler i sine produkter. Den ene strategi baserer sig på den vandrette akse i The Module Application Matrix, der viser graden af modularisering. Dette sker ud fra en top-down tilgang, hvor der tages udgangspunkt i hele eller store dele af produktet. Den anden strategi baserer sig på den lodrette akse, der viser detaljeringsgraden i de moduler, produktet indeholder. Dette ud fra en bottom-up tilgang, hvor der fokuseres på enkelte dele af produktet.

Det er vigtigt nøje at definere, hvilket mål der er for et givet modulariseringsprojekt og dermed være bevidst om, hvordan strategierne anvendes. Der er dog ikke fundet forhold, der forhindrer, at de to strategier kan kombineres. Det vil også være en forudsætning for at nå en fuld modularisering og detaljering, svarende til modulariserings- og Mass Customization teorierne.

## Vurdering af pålidelighed

De anvendte oplysninger om henholdsvis NCC's skakt og Altan.dk fremgår af to rapporter fra Byggeriets Innovation, [Byggeriets Innovation, 2007], [Byggeriets Innovation, 2008]. Rapporterne er kombineret med interviews og med arbejdet i de to virksomheder. Oplysningerne om NCC's konceptbyggeri er baseret på erfaringer fra opstarten og udviklingen af NCC's konceptbyggeri og fra arbejder udført i dette projekt.

Det er i forbindelse med vurdering af de to strategier meget vigtigt at være bevidst om, hvad der opfattes som det samlede produkt. I dette arbejde er der fokuseret på hele bygningen som det samlede produkt. Et andet fokus, f.eks. på en byggevareleverandørs slutprodukt, kan give en anden opfattelse af de to strategier.

Undersøgelserne på dette område har hovedsageligt fokuseret på NCC, omend også andre virksomheder har været inddraget. Det er derfor relevant at evaluere, om resultater, hovedsageligt fundet hos NCC, er alment gyldige, og om de kan generaliseres ud på andre virksomheder. NCC er en

af Danmarks og Skandinaviens største entreprenørvirksomheder. Der er dog tale om forholdsvis nationale markeder samtidig med, at hverken NCC eller andre entreprenørvirksomheder kan siges at have en dominerende position på markedet. NCC adskiller sig på disse punkter ikke væsentligt fra andre virksomheder i branchen. Et område, hvor NCC måske adskiller sig lidt, er forholdet til kunderne, hvor NCC koncernen har sine egne developmentvirksomheder, NCC Property Development A/S og NCC Bolig A/S. NCC Construction udfører dog arbejdet for disse NCC virksomheder i forholdsvis almindelig totalentreprise, som det kendes fra det øvrige private marked.

## Detalldiskussion

Selv om der ikke ses forhold, der forhindrer, at de to strategier kombineres, og selv om de stræber mod det samme mål, er der væsentlige forskelle på de to strategier. Med en top-down tilgang kan virksomheden forholdsvis hurtigt dække hele eller store dele af produktet. Dermed får virksomheden mulighed for at anvende de udviklede løsninger i salgsfasen, hvor det i dialogen med kunderne hurtigt bliver muligt at fremlægge virksomhedens produkter. Bottom-up tilgangen går ikke så direkte efter dette mål, hvad vi da også kan se i forhold til NCC's præfabrikerede skakt. NCC må forvente, at deres kunder i først omgang har meget begrænsede præferencer og interesse i forhold til det delelement, som skakten udgør. Det kan aldrig forventes at blive den afgørende faktor i forbindelse med salget af NCC's primære produkt, hele bygningen. Det samme er ikke tilfældet hos Altan.dk, som baseret på deres udvikling kan gå i meget direkte dialog med deres kunder. Det hænger sammen med, at Altan.dk er meget langt i deres udvikling samtidig med, at de har valgt at afgrænse sig til kun at sælge det modulariserede produkt, altanen. Selv om NCC's bottom-up fokuserede produkt, skakten, ikke har direkte indflydelse på salget, kan det udmærket forbedre NCC's position på markedet. De kvalitets- og produktivitetstevninger, der stammer fra skakten, er medvirkende til at gøre det samlede produkt, bygningen, mere attraktivt for kunderne. Da skakten kun udgør en lille del af bygningen, vil selv store produktivitetforbedringer på dette område imidlertid kun have begrænset effekt på slutproduktet. NCC har da også valgt en strategi, hvor skakten ikke kun anvendes på NCC's byggerier, men også sælges eksternt. Hermed kommer NCC til at virke som leverandør af systemleverancer på samme måde som Altan.dk.

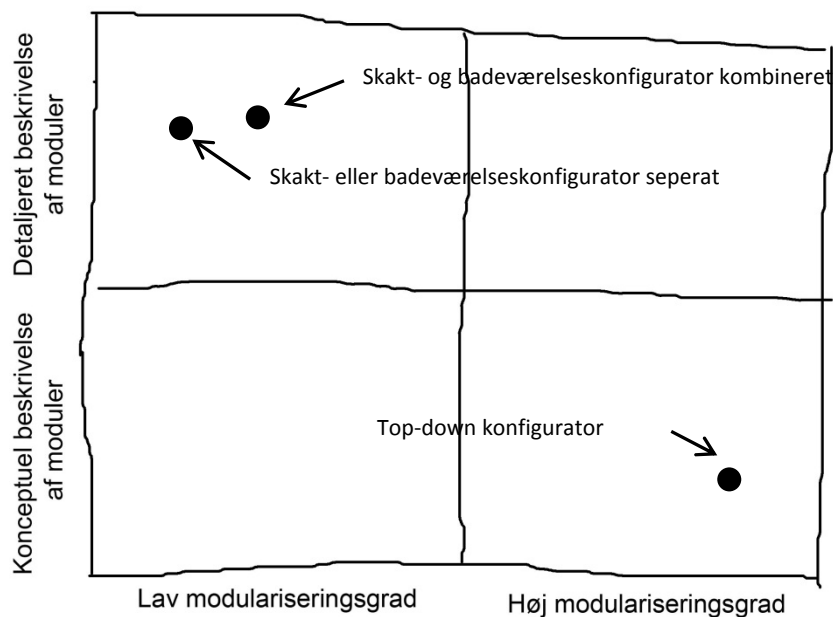
Set i forhold til potentialet i traditionel industrialisering, med fokus på at automatisere og anvende maskiner i produktionen, er bottom-up tilgangen klart den mest anvendelige. Den type af produktion forudsætter en høj detaljeringsgrad i produktionsgrundlaget og et forholdsvis begrænset løsningsrum, forhold som hurtigst kan opnås med en bottom-up tilgang. I forhold til design fasen, hvor en stor del af omkostningerne disponeres, har top-down tilgangen en force ved, selv på et tidligt udviklingsstadium at kunne anvendes direkte i kundedialogen. På den måde kan sandsynligheden for, at løsninger anvendes, forøges, og de direkte gevinster i form af en effektiv designfase kan opnås.

Udfordringen med en bottom-up løsning, er at opnå direkte og tidlig adgang til kunden eller dennes repræsentant i form af arkitekten, er en væsentlig årsag til, at NCC ønsker at udvikle en badeværelseskonfigurator til skaktløsningen. Altan.dk har, særligt i forhold til eksisterende bygninger, ikke den samme udfordring i at opnå tidlig kontakt med kunden, da altanløsningen kan udgøre hele eller væsentlige dele af projektet. Altan.dk sikrer sig den direkte kontakt ved aldrig at fungere som underentreprenør, men kun at fungere som fagentreprenør med direkte kontrakt med bygherren.

## 5.4. Hvordan kan konfigureringsystemer anvendes i en entreprenørvirksomhed (til implementering af moduler og produktarkitektur)?

Inden dette spørgsmål besvares, vil de tre arbejder, der ligger til grund for besvarelsen, blive gennemgået. De tre arbejder er udvikling af en badeværelseskonfigurator, udvikling af en skaktkonfigurator og udvikling af en top-down konfigurator, der tager udgangspunkt i hele bygningen. Det første og det sidste arbejde er også publiceret i artiklerne "Supporting Design Processes by Means of Configuration", Appendiks 5 og "Modularization in the Construction Industry through a Top-Down Approach", Appendiks 3.

Beskrevet med The Module Application Matrix, placerer arbejderne med badeværelses- og skaktkonfiguratorerne sig i den øvre, venstre del med høj detaljering af modulerne, men med lav grad af modularisering set i forhold til den samlede bygning. Top-down konfiguratoren placerer sig derimod i den modsatte kvadrant, med lav grad af detaljering, men med forholdsvis høj grad af modularisering, se Figur 33.



Figur 33 MAM med Skakt-, badeværelses- og top-down konfigurator

### Badeværelseskonfigurator

Den præfabrikerede og konfigurerbar installationsskakt er primært udviklet til anvendelse ved nyopførelse af etageboliger, men principperne har også været anvendt i forbindelse med renovering af etageboliger. I visionen fremsættes ønsket om, at designet af badeværelset, med tilhørende skakt, skal kunne foretages i et konfigureringsystem, som NCC, via internettet, vil udbyde til arkitekterne. Konfiguratoren skal sikre, at arkitekten, når han designer grundplanen, giver skakten en størrelse, så de tekniske installationer kan være i den. For NCC er målet, at den præfabrikerede skakt tænkes ind i projektet allerede i arkitektprojektet, med et forventet mersalg af skakten til følge. Arkitekten har ofte intet eller kun et meget lille fokus på skakten og ønsker dybest set bare, at den fylder så lidt som muligt. [Byggeriets Innovation, 2008]. Det vil således ikke vække arkitektens interesse, at NCC udbyder en konfigurator, som alene understøtter designet af skakten. Målet er derfor, at en konfigurator skal omfatte både badeværelset og skakten – et mål, der hænger godt sammen med, at det kræver en række oplysninger om badeværelset at designe skakten. Ved at medtage badeværelset vil konfiguratoren kunne hjælpe arkitekten med at designe et badeværelse, der overholder gældende regler og anvisninger. Det er projektgruppens forventning, at en sådan funktionalitet vil gøre det attraktivt for arkitekter at anvende konfigureringsystemet.

NCC har opstillet en række ønsker til, hvad et konfigureringsystem skal kunne, både for at være attraktivt for arkitekter og for at tilfredsstille NCC's ønske om at generere kundeleads.

NCC's ønsker at konfiguratoren skal:

1. kontrollere om regler og normer er overholdt
2. give frihed i designet
3. give skaktens dimensioner
4. håndtere badeværelsets hovedelementer
5. aflevere resultatet i et format, der kan overføres til andre systemer
6. have en enkel, elegant og intuitiv brugergrænseflade

Punkt 1 og 2 er meget centrale, men de medfører en problemstilling, som normalt undgås i forbindelse med udvikling af konfigureringsystemer. Lad os dog først se på, hvad det er for et regelgrundlag, der ønskes overholdt. Grundlæggende er det Bygningsreglementet 2008 (BR08) [Byggecentrum, 2008], der udstikker de grundlæggende rammer. Dernæst er det Statens Byggeforskningsinstitut (SBI) anvisning 216 om bygningsreglementet [SBI, 2008], som forklarer og kommer med eksempler på, hvordan kravene i BR kan realiseres. Dertil kommer SBI anvisning 222, Tilgængelige boliger [Sigbrand & Jensen, 2008], og Dansk Standard (DS) 3028:2001, Tilgængelighed for alle [Dansk Standard, 2001]. De to sidstnævnte opstiller og begrunder en række tilgængelighedskrav, som typisk er mere vidtgående end BR, og som særligt tager hensyn til brugere med større eller mindre handicap eller plejebehov. Selv om de fire publikationer omhandler meget andet end badeværelser, er der tale om et regelgrundlag, som samlet er på langt over 800 sider. Reglerne består af en række enkeltkrav, som hver især skal overholdes. Når disse enkeltkrav er overholdt, opstilles ikke yderligere begrænsninger. Reglerne definerer således ikke et endeligt løsningsrum for, hvordan badeværelser må designes, noget der ellers ofte er et væsentligt formål med konfigureringsystemer. Denne udfordring bliver yderligere forstærket af punkt nr. 2, som siger, at der skal være frihed til at designe et vilkårligt badeværelse, bare det overholder minimumskravene i de valgte regelsæt i de fire publikationer. Traditionelle konfigurerings-systemer, eksempelvis Tacton's Konfigurator, kan ikke håndtere et sådant uendeligt løsningsrum, og man må derfor kigge efter andre løsninger. Disse løsninger kan enten tilbyde en anden funktionalitet eller anvende andre teknologier end traditionelle konfigurerings-systemer. Løsningerne er beskrevet i fire scenarier, som dækker et forholdsvist bredt spænd af funktionalitet og teknologier, men som naturligvis ikke beskriver alle tænkelige løsninger.

Alle fire scenarier holder fast i den overordnede vision, som udviklingsgruppen bag skakten har opstillet. Nemlig, at der skal udbydes en konfigurator til arkitekten, at fokus skal være på at konfigurere badeværelset, og at skakten er afledt af badeværelsesdesignet.

I det følgende afsnit bliver de fire scenarier beskrevet og evalueret i forhold til henholdsvis den funktionalitet, løsningen giver, og den teknologi, der anvendes. Desuden dækkes pris og risiko ved at udvikle de beskrevne løsninger.

For en detaljeret gennemgang af de forskningsmæssige metoder, der er anvendt i dette arbejde, henvises til artiklen "Supporting Design Processes by Means of Configuration", se Appendiks 5.

## Scenarie 1: Regelkonfigurator

Dette konfigurerings-system anvendes til at samle og levere de regler og normer, der skal efterleves, når et badeværelse designes. Outputtet fra konfigurerings-systemet er således ikke et badeværelsesdesign, men det regelgrundlag, der skal følges, når badeværelset designes. Dele af reglerne er opdelt efter tre forskellige anvendelseskategorier; General, Selvhjulpne kørestolsbrugere og Kørestolsbrugere med plejebehov. Inden for hver anvendelseskategori har de forskellige regel- og normsæt tre til 18 forskellige regler, der influerer på badeværelsesdesignet. Nogle af reglerne er identiske og andre varierer på tværs af de forskellige norm- og regelsæt og anvendelseskategorier. For arkitekten betyder det, at han skal holde styr på 31 regler. Hvilke af disse, der skal overholdes, afhænger af anvendelseskategori og valg af normsæt.

Regelkonfiguratoren fungerer ved at brugeren specificerer to ting: Anvendelseskategorien og de regel- og normsæt, der ønskes overholdt, se Figur 34. Baseret på disse input leveres et output i form af de regler, som skal overholdes når designet gennemføres.

Figur 34 Valg af anvendelseskategori og regel- og normsæt

Afhængig af efterbehandlingen, layout og illustrationer, vil en liste med regler fylde i størrelsesordenen en til tre A4-sider. Det skal sammenlignes med de fire publikationer på over 800 sider, som de relevante regler i dag skal findes i. Brugervenligheden må således siges altid at være bedre end i den nuværende situation, men den vil variere afhængig af, hvordan outputet bliver behandlet. Her kan man forestille sig flere muligheder:

- **Simpelt udtræk:** Reglerne i de fire publikationer er filtreret, så kun de regler, der er relevante for den ønskede anvendelse, medtages. Der foretages ingen efterbehandling eller koordinering imellem de forskellige regler.
- **Redigeret udtræk:** Reglerne er også her filtreret, men overlap i regelsættene er fjernet, så hver regel kun optræder en gang. Det er mest relevant imellem BR og SBI anvisning 216, som jo er en uddybning af BR. Samtidig kan de mest velegnede illustrationer fra regel- og normsættene medtages.
- **Analytisk udtræk:** For at undgå redundante regler udtrækkes kun de mest vidtgående regler. Dvs., at man eksempelvis ikke vil opleve, at ét regelsæt siger, at en minimumsafstand skal være 1,2m, og et andet siger 1,6m. I sådanne tilfælde vil kun den mest vedgående regel blive vist, i dette eksempel de 1,6m.

Outputet fra den her beskrevne konfigurator vil bestå af udtræk fra publikationer, som udvikleren af konfigureringsystemet ikke umiddelbart har rettigheder til at videredistribuere. Dette forhold skal håndteres, inden konfiguratoren udvikles. Problemstillingen ligger dog uden for fokus i denne afhandling.

Den grundlæggende funktionalitet af denne konfigurator, valg af regel- og normsæt samt anvendelseskategori, vil også skulle inkluderes i de tre andre konfiguratorer. Her vil outputet dog ikke blive vist direkte men blive brugt som input, når designet efterfølgende udføres.

### **Funktionel evaluering**

Dette konfigureringsystem hjælper arkitekten med at finde de regler, der er relevante i forbindelse med udarbejdelsen af et badeværelsesdesign. Dermed undgår arkitekten at skulle huske eller slå reglerne op og sammenholde dem. Det reducerer den tid, arkitekten skal bruge på at finde de regler, der skal overholdes, når badeværelset skal designes. Hovedgevinsterne i form af et effektivt designværktøj og en validering, der sikrer at designet overholder reglerne, og at skakten har optimal størrelse, opnås imidlertid ikke. Der kan også kun forventes en begrænset reduktion i den tid, der bruges på at udarbejdes designet, og i den kalendertid, koordineringen mellem arkitekt, ingeniør og myndigheder kræver. Regelkonfiguratoren hjælper dog arkitekten, så han i højere grad kan fokusere på et design med den funktion og det udtryk, han ønsker, fremfor at bruge kræfter på at holde styr på regelsæt, som kun i begrænset omfang er indbyrdes koordineret.

Set fra NCC's synspunkt vil man tidligt i processen kunne skabe kontakt til arkitekter, når de bruger regelkonfiguratoren. NCC kan bruge kontakten til at komme i dialog med arkitekten om, hvordan designet kan tilgodeses brugen af NCC's præfabrikerede installations-skakt. Denne dialog, samt det arbejde, der skal til for at sikre, at den tilgodeses, ligger dog uden for konfiguratoren. Det vil som udgangspunkt være manuelle processer.

### **Teknisk evaluering**

Det løsningsrum, som konfigureringsystemet skal håndtere, indeholder et endeligt antal løsninger, et endeligt løsningsrum. Inputtet til konfigureringsystemet er også ganske simpelt og består alene af to parametre, som kan vælges via eks. dropdown menuer eller radio buttons. Som beskrevet kan outputtet redigeres i større eller mindre omfang. Hvis vi ser bort fra det rent grafiske, kan denne redigering i vid udstrækning ske ud fra en række matematiske/logiske operationer, så som: if  $a > b$  then output = a. På visse områder kan der ligge et analyse- og måske også et definatorisk arbejde i at sikre, at kravene i de forskellige normer og regler kan sammenlignes. Der er dog ikke i forbindelse med arbejdet på prototype konfiguratoren dukket tilfælde op, som antyder, at dette kan være et problem. Den beskrevne funktionalitet kan etableres ved brug af almindelige programmeringssprog og databaseteknologi, såsom C+, C++ og MySQL. Disse teknologier er velegnet til interaktion via internettet med brug af eks. asp.NET.

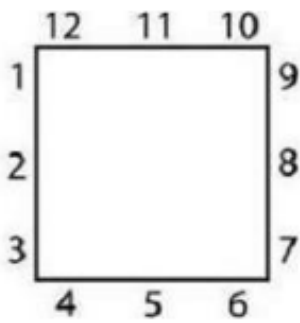
### **Evaluering af omkostninger og risiko**

Det beskrevne konfigureringsystem indeholder, set med IT-øjne, et meget begrænset antal regler og attributter. Kombineret med muligheden for at bruge velkendte og udbredte teknologier gør samlet set, at risikoen ved at udvikle det beskrevne system må betegnes som lav, set fra et teknisk synspunkt. Risikoen i forhold til det funktionelle, om arkitekterne vil bruge systemet, er ikke direkte vurderet. Den bør kunne klarlægges, inden en eventuel udvikling igangsættes.

Omkostningerne ved at udvikle systemet er vurderet til at være relativt lave, selvfølgelig afhængig af typen og omfanget af grafik. Samtidig findes et stort antal leverandører, som kan udvikle denne type løsning, hvilket er medvirkende til at holde omkostningerne nede. Eventuelle omkostninger til at håndtere ophavsretten er, som tidligere beskrevet, ikke medtaget i denne betragtning.

## **Scenarie 2: Arketypekonfigurator**

Dette scenarie baserer sig på et ønske om at håndtere badeværelsets planløsning inden for et endeligt løsningsrum. Der er i forbindelse med projektet udviklet en prototype konfigurator af netop denne type. Det endelige løsningsrum er skabt ved at dele badeværelset ind i 12 sektioner, hvor hvert af badeværelsets fire hovedelementer, toilet, håndvask, bad og dør, kan placeres, se Figur 35. Da der maksimalt må placeres ét hovedelement i hver sektion, giver det principielt  $12 \cdot 11 \cdot 10 \cdot 9 = 11.880$  kombinationsmuligheder. Da badeværelset kan roteres, uden at indretningen ændrer sig, kan løsningsrummet reduceres til en fjerdedel, hvilket giver 2.970 arketyper af badeværelser. Afhængig af hvilke regelsæt, der ønskes fulgt, vil et antal af dem dog ikke være lovlige.



Figur 35 Badeværelsets ni sektioner

Principielt kan konfigureringen foregå ved at brugeren vises alle mulige kombinationer. Arkitekten kan så vælge den kombination, der ønskes. Konfigureringsystemet kan på den baggrund beregne badeværelsets minimumsdimensioner baseret på det valgte regel- og normsæt. Arkitekten skal herefter selv udvide badeværelset, hvis der ønskes en større variant. Denne udvidelse skal foregå uden for konfiguratoren. En oversigt med op til 2.970 arketyper er dog umulig at overskue og vil på ingen måde fremstå brugervenligt. Selv om der principielt er frihed til at designe det badeværelse, der ønskes, vil en sådan oversigt over arketyper antageligvis ikke give arkitekten denne oplevelse. Det er da heller ikke sådan prototype konfiguratoren er udviklet.

I prototype konfiguratoren kan arkitekten vælge hvilken sektion, et givet element ønskes placeret i og så blive guidet, så elementerne løbende bliver placeret i henhold til det valgte regel- og normsæt.

Eksempel:

Der ønskes et design, der overholder BR og DS i henhold til anvendelseskategorien Selvhjulpne kørestolsbrugere.

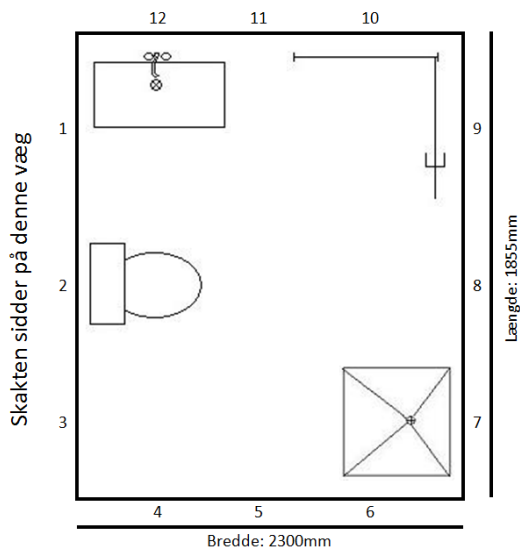
Hvis toilettet er placeret i sektion 2, vil det være muligt at placere håndvasken enten i sektion 1, 3, 4 eller 12.

Se Figur 36 Eksempel på valg af placering.

POSITIONERING

Figur 36 Eksempel på valg af placering

Når valgene er foretaget, vil konfigureringsystemet oplyse badeværelsets minimumsdimensioner. Prototypekonfiguratoren viser endvidere en principskitse af det ønskede badeværelse, se Figur 37.



Figur 37 Principskitse over badeværelsets indretning

Når konfigurationen er foretaget, er der mulighed for, at parametrene kan overføres til et CAD/BIM program, som kan skabe en 3D model af badeværelset. Tacton har som eksempel en sådan integration med SolidWorks. Overførslen vil dog som udgangspunkt være baseret på det mindst mulige badeværelse, et minimumsbadeværelse. Dette, sammen med, at der på nuværende tidspunkt ikke findes integration mellem Tacton og de CAD/BIM systemer, der er udviklet til byggeriet, gør, at denne del er udeladt af dette scenarie.

### Funktionel evaluering

Den udarbejdede prototype konfigurator viser, at det er en meningsfuld måde at konfigurere et badeværelse på, men også, at metoden er så stram, at det går ud over brugervenligheden. Det forstærkes af, at arkitekten kun kan konfigurere et minimumsbadeværelse, og at han på den baggrund selv må udlede det ønskede design. Forskellen mellem det konfigurerede og det ønskede vokser i takt med, at badeværelset udvides udover minimumskravene. Konfiguratoren vil derfor være mest egnet til minimumsbadeværelser i eks. alment boligbyggeri, hvor optimering i forhold til pris og funktionalitet spiller en stor rolle.

Det forhold, at arkitekten selv, uden for konfiguratoren, skal udvide badeværelset til den ønskede størrelse, forhindrer også, at skaktens dimensioner kan beregnes. Arkitekten vil således alene blive oplyst om, hvor skakten optimalt bør placeres. Da det altid er bag toilettet, må værdien af denne oplysning betegnes som begrænset.

### Teknisk evaluering

Arbejdet med at udarbejde prototypen viser, at der ikke er tekniske hindringer forbundet med at udvikle det beskrevne konfigureringsystem, og at det kan gøres med traditionel konfigureringssoftware. Det er dog ikke umiddelbart muligt at overføre resultaterne til de CAD/BIM systemer, som normalt anvendes i byggebranchen. Tacton, som er brugt til at udvikle prototypen, giver heller ikke mulighed for at eksportere i eksempelvis DWG eller IFC format.

Tacton har et webinterface, som gør det muligt at stille konfiguratoren til rådighed for arkitekterne via internettet, uden at skulle integrere den med andre systemer. Den største udfordring ses derfor at være udviklingen af en brugergrænseflade, der appellerer til arkitekterne og understøtter deres kreative proces.

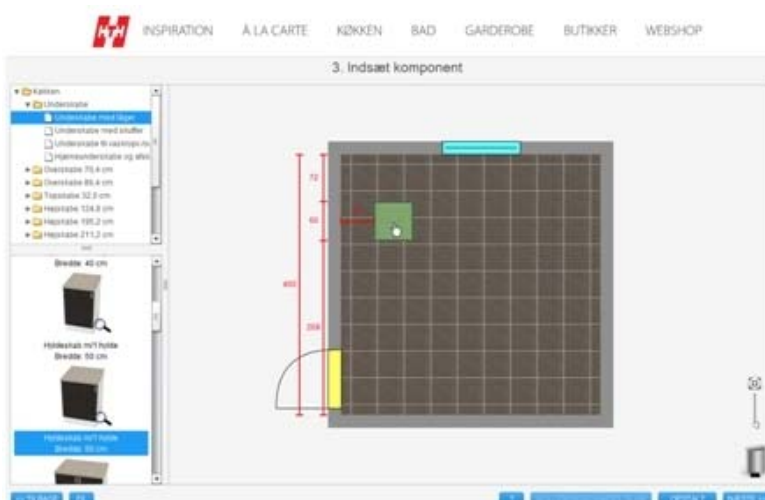
### Evaluering af pris og risiko

Arbejdet med at udvikle prototype konfiguratoren viser, at der teknisk set ikke er noget nyt i at udvikle den beskrevne løsning, og at det kan gøres med et standardkonfigureringsystem. Rent udviklingsmæssigt er risikoen derfor alene knyttet til de klassiske beslutninger om valg af den rigtige leverandør og udvikling af den rigtige løsning. Prototype konfiguratoren indeholder i størrelsesordenen 230 regler og attributter og omkostningerne til at udvikle en professionel udgave vurderes at være relativt lave.

## Scenarie 3: Grafisk konfigurator

I denne konfigurator definerer arkitekten et badeværelsesrum i enten 2D eller 3D. Herefter trækkes de ønskede elementer, toilet, håndvask mm., fra et bibliotek og placeres i rummet. Elementerne kan flyttes rundt i rummet, som det ønskes, men systemet markerer, hvis et eller flere regelsæt overtrædes. Denne markering kan eksempelvis ske ved at farve elementet rødt eller ved automatisk at flytte det til en lovlig placering. Når konfigurationen er foretaget, kan designet downloades i eks. DWG eller IFC format og overføres til arkitektens CAD/ BIM system.

Der findes en række eksempler på, at byggevarerleverandører har udviklet konfigureringsystemer af denne type. Eksempler er verdens største møbelkæde IKEA og køkkenfirmaet HTH. I Figur 38 ses et skærmbillede fra HTH's køkkenkonfigurator.



Figur 38 HTH køkkenkonfigurator



På trods af, at der findes en lang række af denne type konfigureringsystemer, har det ikke været muligt at finde beskrivelser af virkemåden bag systemerne i den videnskabelige litteratur. Det har således ikke været muligt at finde beskrivelse af, hvordan den bagvedliggende ræsonnering foregår. Rent tekniske benytter HTH's konfigurator sig af Adobe's Flash teknologi, som også anvendes i en lang række online spil.

Der findes en række leverandører af denne type konfigureringsystemer. Her kan nævnes den svenske leverandør Configura<sup>®</sup> [[www.configura.com](http://www.configura.com)] og de danske 3Dfacto [[www.3dfacto.com](http://www.3dfacto.com)] og Dalux [[www.dalux.dk](http://www.dalux.dk)].

### **Funktionel evaluering**

Brugen af disse konfigureringsystemer minder på mange måder om at bruge BIM systemer. Samtidig er de meget intuitive og brugervenlige. Både IKEA og HTH's konfiguratorer henvender sig også direkte til private kunder. Det er muligt at give brugerne en stor oplevelse af frihed sammenlignet med mere valgbaserede systemer og at medtage skakten og angive dens dimensioner. Det betyder ikke nødvendigvis, at der kan designes badeværelser, som ikke kan designes med de systemer, der beskrives i de andre scenarier. Med en grafisk konfigurator foregår konfigurationen bare på en meget fleksibel måde, der understøtter arkitektens kreative proces.

### **Teknisk evaluering**

Det har ikke været muligt at finde litteratur, der beskriver hvordan Flash eller tilsvarende teknologier kan anvendes til grafiske konfigureringsystemer. Men Flash teknologien er udviklet til brug på internettet og er derfor velegnet til dette medie. Der er set eksempler på Flash konfiguratorer, som giver mulighed for at eksportere konfigurationerne til BIM systemer i eks. IFC. Se eksempelvis [www.godenergi.dk/boligtjek](http://www.godenergi.dk/boligtjek).

Interview med en softwareproducent, som udvikler konfiguratorer af denne typer, bekræfter at de anvender teknologier, der også anvendes i spilindustrien. En række ligheder i forhold til grafik, rummelighed og en regelbaseret verden ses da også mellem computerspil og denne type af konfigureringsystemer.

### **Evaluering af pris og risiko**

Flash er en vidt udbredt teknologi, og der er fundet et stort antal mere eller mindre avancerede online konfigureringsystemer, der anvender denne teknologi. Den store udbredelse betyder, at der er mange leverandører, der tilbyder løsninger baseret på Flash. Det er medvirkende til at holde pris og risiko nede. Den forholdsvis omfattende grafiske brugergrænseflade vil derimod trække prisen op. Dertil kommer, at der ikke er fundet videnskabeligt arbejde, der beskriver denne type af konfigureringsystemer. Flash afvikles delvist på brugerens egen computer, hvorfor brugeren skal anvende computersystemer, der understøtter denne teknologi. Men udviklingen på dette område går forholdsvis stærkt, og da det er en udvikling, som NCC ingen indflydelse har på. For eksempel har Flash teknologien en langt mindre dominerende rolle i dag end i 2010, hvor den Tacton baserede prototype konfigurator blev udviklet. På den baggrund vurderes risikoen ved anvendelse af denne teknologi at være høj.

## **Scenarie 4: BIM objekt-konfigurator**

I byggebranchen ses en øget brug af 3D objektorienterede BIM systemer, som ArchiCAD og Revit. Denne type systemer gør en dyd ud af at give arkitekten frihed til at designe alt, hvad teknologien kan håndtere. Der er som udgangspunkt ikke indlagt begrænsninger i, hvad der kan designes. BIM systemerne er som udgangspunkt ikke konfigureringsystemer men avancerede modelleringssystemer med mulighed for at håndtere objekter med en lang række informationer. Modelleringen foregår i vid udstrækning ved at trække objekterne ind i bygningsmodellen fra et bibliotek. Objekterne kan i en vis udstrækning betragtes som små konfigureringsystemer, hvor det enkelte objekt, typisk en bygningsdel, tilpasses. Objekterne er programmeret i et sprog, der er proprietært for BIM systemet. Objekter i ArchiCAD er eksempelvis beskrevet i sproget GDL.

En række byggevarerleverandører har udviklet sådanne objekter til deres produkter. Se eks. [www.3dbyggeri.dk](http://www.3dbyggeri.dk), som indeholder en lang række af disse "digitale produkter". Arkitekterne kan downloade objekterne og placere dem i deres eget bibliotek. Når objekterne efterfølgende indføres i et konkret design, vil der automatisk blive taget hensyn til producenternes produkter. NCC vil på sammen måde kunne udvikle et badeværelses/skaktobjekt og stille det til rådighed for arkitekterne.

### **Funktionel evaluering**

Funktionelt har denne type af løsning den udfordring, at den afvikles på arkitektens computer, og at den derfor forudsætter, at han anvender et af de BIM systemer, som NCC vælger at understøtte. Det er samtidig løsningens største force. Konfigurationen foregår direkte i det program, arkitekten normalt arbejder i, og der er ikke noget behov for efterfølgende at overføre designet fra konfigureringsystemet til et andet system. Set fra NCC har løsningen den store ulempe, at den ikke kan levere kundeleads, og at NCC ingen indsigt har i anvendelsen. Herunder er der ingen sikkerhed for at brugeren anvender den seneste version.

### **Teknisk-evaluering**

Der ses ingen tekniske hindringer for at udvikle objekter af den beskrevne type, og nationalt og internationalt findes et rigt udvalg af leverandører, som kan håndtere denne opgave. Men da hvert af de store BIM software huse anvender deres eget proprietære sprog til at udvikle objekter, må NCC udvikle separate objekter til alle de BIM systemer, NCC ønsker at understøtte. Dette skal ske i de forskellige sprog, som de forskellige BIM systemer anvender. Samtidig er denne type af objekter typisk ikke gearret til at håndtere forskellige regelsæt. Det må derfor forventes, at der skal udvikles separate versioner til hver kombination af regel- og normsæt, NCC vælger at understøtte.

## Evaluering af pris og risiko

Det forhold, at konfigurationen foregår i arkitektens eget BIM system, gør, at NCC ingen udgifter har til at indkøbe og drive et konfigureringsystem. Men det betyder også, at der skal udvikles et stort antal objekter, hvis alle relevante BIM systemer og regel- og normsæt skal understøttes. Samtidig har NCC ingen kontrol over den fremtidige udvikling af BIM systemerne, en udvikling, der kan pålægge NCC omkostninger til at opgradere objekterne.

## Evaluering af scenarierne

De fire scenarier er evalueret i forhold til NCC's ønsker, de tekniske muligheder, samt pris og risiko. Omkostningerne er angivet som et indeks med scenarie 2, arketypekonfiguratoren, der er udviklet en prototype af, som indeks 100. Vurderingen af risiko er baseret på Michel Bernaroch's metode til at vurdere risiko ved softwareudviklingsprojekter. For flere detaljer om evalueringsmetoden se artiklen "Supporting Design Processes by Means of Configuration", appendiks 5.

Tabel 9 Evaluering af scenarier

	Regel konfigurator	Arketype konfigurator	Grafisk konfigurator	BIM objekt-konfigurator
<b>Funktionelle krav</b>				
Afløvere skaktens dimensioner	Lav	Lav	Høj	Høj
Sikre overholdelse af regel- og normsæt	Høj	Middel	Høj	Høj
Oplevelse af frihed i designet	Lav	Lav	Høj	Høj
Håndtering af badeværelsets hovedelementer	Lav	Middel	Høj	Høj
Mulighed for at overføre konfigurationen	Lav	Lav	Lav	Høj
Elegant og appellerende bruger-interface	Høj	Mellem	Høj	Høj
Kundeleads til NCC	Mellem	Høj	Høj	Lav
<b>Risiko områder</b>				
Platformens stabilitet	Høj	Høj	Mellem	Høj
Kendskab til platformen	Høj	Lav	Høj	Mellem
Platformens kompleksitet	Lav	Lav	Mellem	Høj
Kompleksitet i løsningen	Lav	Lav	Høj	Høj
Erfaringer med programmeringssproget	Høj	Høj	Lav	Mellem
Udviklingsomkostning	38	100	223	169

Tabel 9 viser, at den grafiske konfigurator og BIM objekt-konfiguratoren er de to scenarier, der giver de største gevinster, men også er de dyreste og mest risikofyldte at realisere. BIM objekt-konfiguratoren er populær hos de interviewede arkitekter, men har den væsentlige mangel, at den ikke direkte kan generere kundeleads til NCC.

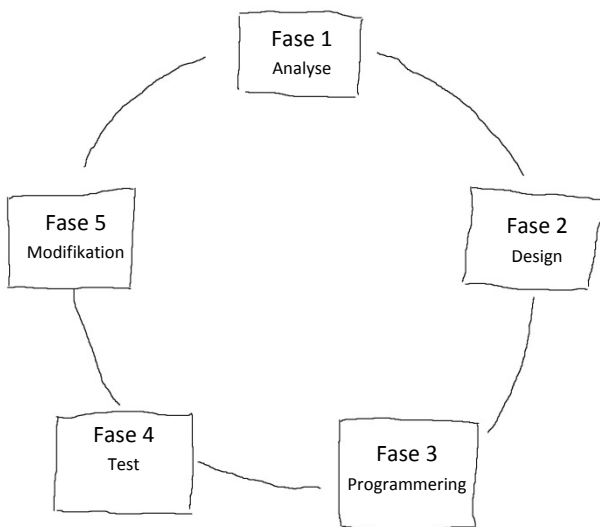
Regel- og arketypekonfiguratorerne er de to mindst værdiskabende. De er til gengæld væsentligt billigere at etablere. Af de to giver arketypekonfiguratoren den største værdi, men da det kan opfattes som et meget låst design, kan det afskrække nogle arkitekter fra at bruge en sådan løsning og i visse tilfælde endda skabe en negativ stemning omkring brugen af konfigureringsystemer i almindelighed.

## Skaktkonfigurator

Ud over den ovenfor beskrevne badeværelseskonfigurator har NCC et ønske om at udvikle en skaktkonfigurator. Hvor en badeværelseskonfigurator skal anvendes af eksterne arkitekter, skal en skaktkonfigurator anvendes internt hos NCC og her medvirke til at effektivisere og ensrette arbejdet med at designe og specificere skakten. Da skakten ikke er underlagt samme regel- og normregulering som badeværelset, er det relevant at se på, hvordan en sådan konfigurator kan udvikles, og hvordan den kan ændre NCC's designproces. Gennemgangen er baseret på arbejde med at udvikle en prototype af en skaktkonfigurator, et arbejde der gennemgås over de følgende sider.

### Etablering af konfigureringsystemet

Den overordnede fremgangsmåde, der er anvendt ved opbygningen af prototypen, er først at opbygge en konfigurator, der er målrettet arkitektens arbejde. Dvs. den beskæftiger sig med de ydre dimensioner af skakten. Herefter blev konfiguratoren udvidet til at omfatte skaktekspertens arbejde, dvs. designet af de indre dele af skakten. Faserne følger metoden beskrevet af L. Hvam [Hvam et al., 2007], se Figur 39 og er gennemført iterativt, hvorfor fase 3 og 4 smeltede sammen og en selvstændig fase 5 ikke blev udført.



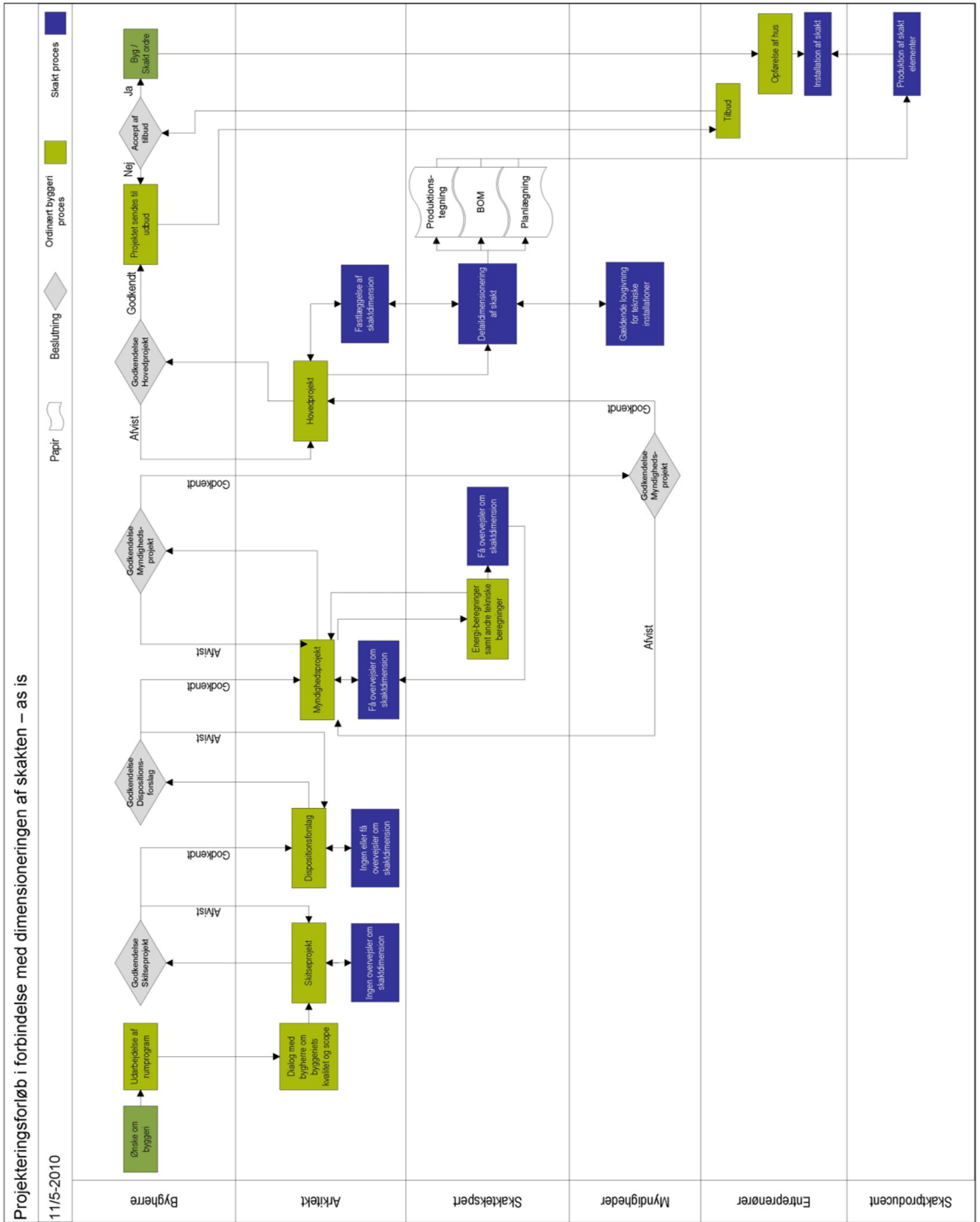
Figur 39 Fremgangsmåden for opbygning af konfigurator

### Fase 1 Analyse

AS-IS

FØRStE fase i at opbygge et konfigureringsystem er at klarlægge, hvordan specificationsprocesserne i dag forløber i forbindelse med dimensioneringen af NCC's præfabrikerede installationsskakt. Det er gjort ved at interviewe en række ingeniører og arkitekter, som arbejder med skakten hos NCC.

Arkitekten undlader ofte at tegne skakten ind på den første version af plantegningen. Eventuelt afsætter arkitekten blot et ukvalificeret estimat af størrelsen. Om den ene eller den anden fremgangsmåde anvendes, afhænger af arkitektens arbejdsform og erfaring. Hvis skakten afsættes, gøres det ud fra et skøn af, hvad arkitekten mener, er et fornuftigt areal til skakten. Det vil sige, at både i skitseprojektet og i dispositionsforslaget er skakten ofte slet ikke tegnet med. Det kan give problemer, hvis bygherre har godkendt disse byggefaser, inden skakten medtages. Dermed risikerer man, at en allerede accepteret plantegning skal revideres og godkendes på ny, før projektet kan fortsætte. Figur 40 viser, hvordan specificationsprocessen for skakten ofte forløber.



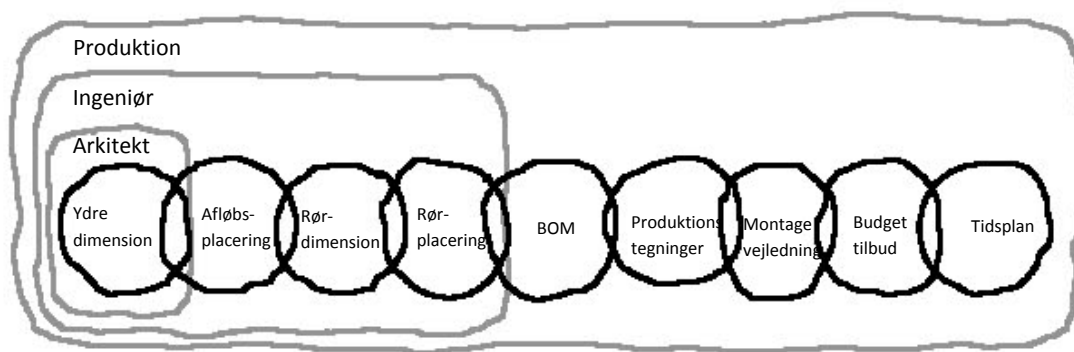
Figur 40 Typisk forløb for specifikationsprocessen (As-Is)

Som det fremgår af processen, bliver skaktens dimensioner ofte først fastlagt sent i forløbet, hvilket kan hænge sammen med, at arkitekterne ikke har kontakt med ingeniørerne før myndighedsprojektet. Når myndighedsprojektet skal udarbejdes, kontakter arkitekten ingeniørerne, og alle bygningens tekniske egenskaber bestemmes, såsom bygningens energiregnskab. Herefter bliver arkitekterne ofte sendt videre til en konstruktør, som bl.a. fastlægger skaktens omtrentlige dimensioner. Kun i forbindelse med meget komplekse og usædvanlige byggerier er det ingeniører, der designer skaktene. Derfor betegnes konstruktører/ingeniører, der beskæftiger sig med skakten, herefter som skaktekspertes.

I hovedprojektet detaillimensioneres skakten. Dvs., at specifikke rør- og kanaldiametre fastlægges. Det er også i forbindelse med hovedprojektet, at produktionstegninger, styklister (BOM), operationslister osv. udarbejdes. Dette arbejde foregår i en vis udstrækning manuelt med brug af bl.a. AutoCAD. Et estimat for hele gennemløbstiden fra tegning til levering af den præfabrikerede skakt er typisk 6-10 uger, hvoraf selve produktionen tager omkring 2-3 uger.

### Output fra konfiguratoren

Outputtet fra konfiguratoren kan varieres afhængig af ambitionsniveau og målgruppe. Hvis målgruppen alene er arkitekter, kan funktionaliteten holdes på et minimum, hvor outputtet alene består af skaktens ydre dimensioner eventuelt med mulighed for at vælge mellem forskellige geometriske udformninger. Hvis også ingeniørens arbejde inkluderes, skal konfiguratoren levere både indretningen og dimensioneringen af skaktens komponenter. Mest vidtgående bliver det, hvis outputtet af konfiguratoren skal anvendes direkte i produktionen. Se Figur 41 for mulige scenarier for konfiguratorens output.



Figur 41 Scenarier for konfiguratorens output

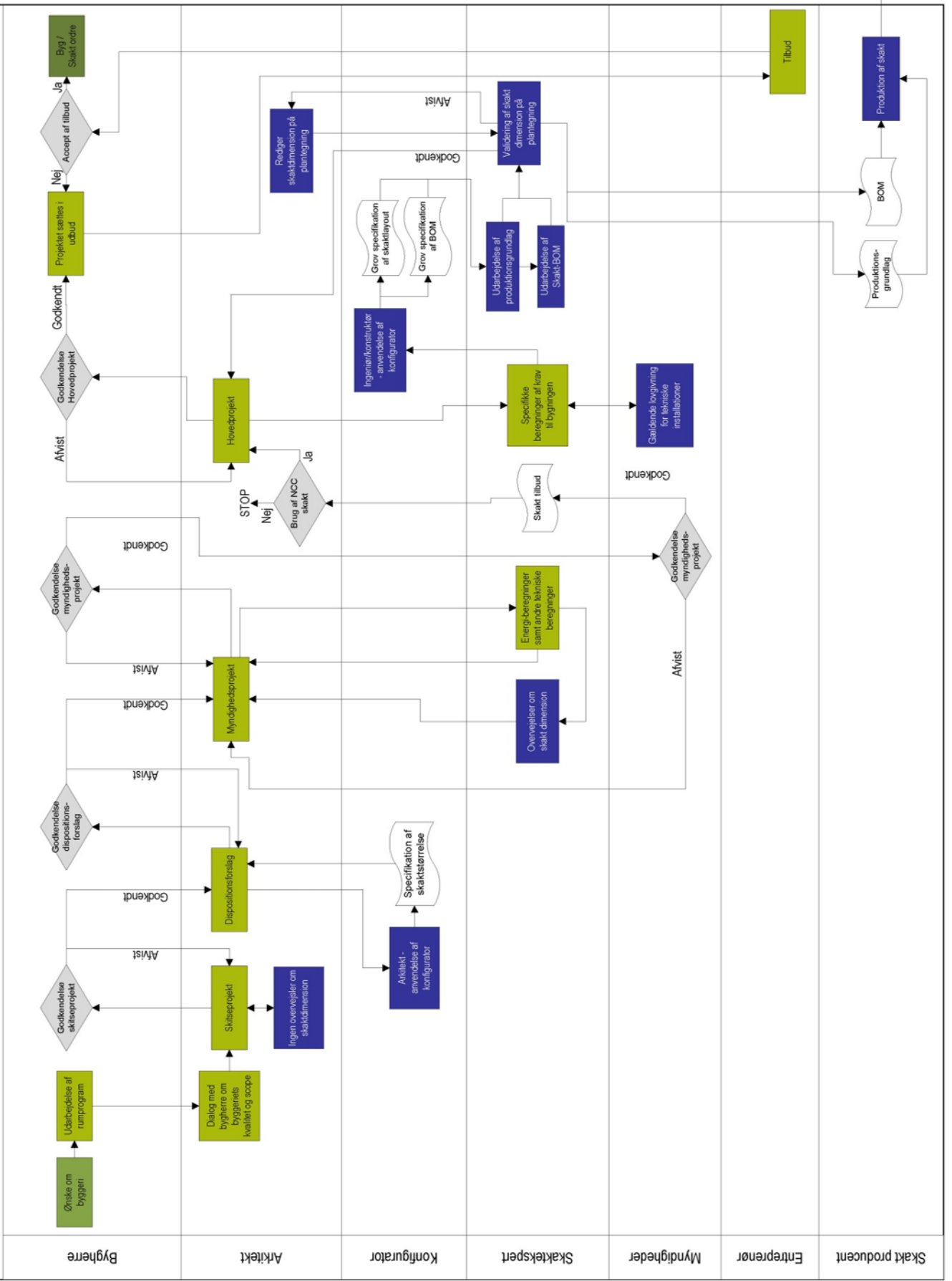
I forbindelse med udviklingen af prototype konfiguratoren er det valgt at fokusere på at understøtte henholdsvis arkitekt og ingeniør. Samtidig er det valgt kun at medtage én geometrisk form, nemlig en aflang skakt. Disse valg er truffet under hensyntagen til, at der er tale om en prototype. Dette scope tager også hensyn til, at NCC ikke har erfaring med anvendelse af andre konfigureringsystemer, og at løsningen efterfølgende kan udbygges til at omfatte produktionen. Arkitekt og ingeniør har i denne sammenhæng meget forskellige behov, hvorfor de to grupper udspænder et bredt felt. De forskellige behov gør, at det er valgt at opbygge en todelt configurator. Den første configurator giver, på baggrund af arkitektens input, et output i form af en 2D-skitse af skaktens ydre dimensioner. Den anden configurator er en skaktekspertkonfigurator, der vha. arkitektens input samt yderligere input fra skakteksperten kan give overslag over, hvordan skakten skal detaillimensioneres. Dvs., den giver information om diameter og indbyrdes placering for rør og kanaler. Herudover skal konfiguratoren give overslag over isoleringstykkelse samt maksimal afstand til afløb. Konfiguratoren skal således give overslag over skaktens indhold og layout.

### Specifikationsprocessen

I den første configurator får arkitekten en skitse af hvor meget plads, der skal afsættes til installationsskakt. Konfiguratoren skal indeholde information nok til at bestemme dette areal og derefter give arkitekten output i form af en 2D-skitse af skaktens ydre dimensioner. Hvis det herefter besluttes, at byggeprojektet skal anvende NCC's skakt, vil en skaktekspert, vha. den anden configurator, supplere arkitektens input med yderligere, mere tekniske input, og dermed udforme skaktens indre design. Skaktekspertens arbejde med at detaildesigne skakten bliver således simplificeret markant. Efter konfigureringen skal skakteksperten verificere skaktens layout og indhold, hvorefter han bliver nødt til manuelt at udforme produktionstegninger, operationsliste, styklister (BOM) og planlægning som i as-is-processen. Figur 42 viser specifikationsforløb for to-be-processen.

# Specifikationsproces – Scenarie 2 – To be

2/6-2010 – Version 3



Figur 42 Specifikationsprocessen to-be

I dette scenarie er Customer Order Specification Decoupling Point (COSDP) [Hvam et al., 2007] flyttet længere frem i specifikationsprocessen. Det betyder, at løsningsrummet er blevet afgrænset. Virksomheden nærmer sig modify-to-order kategorien [Hvam et al., 2007]. Det medfører, at skakten opbygges på baggrund af nogle generiske strukturer, hvorefter selve produktet modificeres af skakteksperten inden for de gyldige regler.

## Output

Konfiguratoren vil give følgende outputs:

- 2D-skitse af skaktens ydre dimensioner
- Angivelse af, hvor langt fra skakten afløb kan være placeret
- Overslag over rørdiametre, isolering og kanaldiametre
- Overslag over rørenes indbyrdes placering inkl. 2D-skitse

## Fase 2 – Opbygning af dokumentation for produktprogram

Denne fase fokuserer på udviklingen af en konfigurerbar skakt og ikke analyse af et eksisterende produktprogram, da det ikke findes som sådan for NCC's installationsskakt. Fase 2 vil derfor omhandle udviklingen af et nyt modulært og konfigurerbart produktprogram. Det indebærer en beskrivelse af de indgående modulers opbygning og sammensætning samt tilhørende dokumentationen. Kapitlet er opbygget med en introduktion til udviklingen af indgående moduler. Derefter følger en beskrivelse af sammensætningen af disse moduler og til sidst beskrives, hvordan al relevant viden om den konfigurerbare skakt er dokumenteret. Dokumentationen vil bestå af en Produkt Variant Master samt tilhørende Class Responsibility Collaboration Card (CRC-kort) [Hvam et al., 2007].

## Konfigurerbar skakt

Hos NCC er man som tidligere nævnt begyndt at producere præfabrikerede installationsskakte. De præfabrikerede skakte bliver primært lavet til standard etageboligbyggerier. Skaktene indeholder derfor de mest elementære installationer, som er nødvendige for, at byggeriet bliver funktionsdygtigt. Jf. afgrænsningen i afsnit 5.1 indeholder skakten følgende installationer:

- Ventilation
- Varmeforsyning
- Spildevands afløb
- Tagvands afløb
- Vandforsyning
- Strømføring

Installationerne kan betragtes som funktioner. Det forventes som udgangspunkt, at de fleste standardlejligheder har behov for alle funktionerne. Dog er det ikke alle etageboligbyggerier, der efterspørger samtlige funktioner. Derfor skal det være muligt at fra- og tilvælge funktionerne i den konfigurerbare skakt.

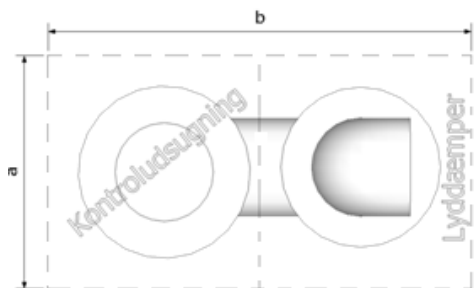
Hvis vi for eksempel betragter funktionen ventilation, kan den etableres gennem to principløsninger for ventilation: kontroludsugning og varmegenindvinding. Hvis principløsningen kontroludsugning vælges, betyder det, at der placeres en udsugningskanal i skakten. På samme måde opdeles skaktens øvrige funktioner i moduler baseret på funktioner, som skakten indeholder. Installationsskaktens hovedelementer kan herved tilpasses til det enkelte byggeri ved at kombinere moduler med de ønskede funktioner.

Ud over, at modulerne kan indgå i forskellige kombinationer, vil modulerne også kunne variere geometrisk. Eksempelvis vil størrelsen af ventilationskanalen variere efter hvor stort behov, der er for udsugning. Det afgøres af antallet af etager og lejlighedens areal. Installationsskakten bliver på den måde konfigureret ved at anvende forskellige former for modularisering, primært "Component Swapping Modularity" og "cut-to-fit" modularisering. Modulerne bliver på denne måde tilpasset geometrisk og funktionelt til kundens behov.

## Etablering af moduler

Modulerne er etableret i samråd med NCC's skaktekspert, som har bidraget med den byggefaglige viden. Arbejdet med udvikling af moduler foregår i 2D for at skabe overblik over det areal, skakten vil optage. Et eksempel på et modul er det tidligere omtalte modul for kontroludsugning. Hvis kunden ønsker, at lejlighederne skal ventileres ved kontroludsugning, vil skakten indeholde modulet illustreret i Figur 43. Modulet er opbygget af udsugningskanal, lyddæmper og brandisolering.

Afgørende for opbygningen af modulet er bygningsreglementets krav om afstand på minimum 50 mm imellem alle installationer. Derfor er der om modulet optegnet en firkant, som markerer det areal, modulet optager, se Figur 43.



Figur 43 Kontroludsugningsmodul

Firkanten er optegnet således, at siderne er 50 mm fra det yderste af det fysiske modul. Herved er der skabt en form for *respektgrænse* overfor andre moduler. Alle moduler på nær kabelstigen har denne respektgrænse på 50 mm. Modulernes respektgrænse kan overlappe hinanden, når to moduler placeres ved siden af hinanden. Herved skabes den fornødne afstand på 50 mm imellem modulerne. Mindre komponenter som rørbojninger, T-stykker, beslag, skruer osv. er ikke medtaget i modulerne for at simplificere udviklingsprocessen.

Nogle moduler varierer meget i størrelse, alt efter hvilken kapacitet, de skal levere. Eksempelvis vil det volumen, skakten skal forsyne, have stor indflydelse på ventilationskanalernes størrelse. Derimod varierer varme- og brugsvandrørene kun begrænset i størrelse. På den baggrund antages disse to modulers ydre dimensioner at være faste, og den ydre dimension baseres på den størst mulige diameter. Dermed vil det udelukkende være størrelsen af ventilationen, længden af fordelerrørene samt tilvalg af moduler, der afgør skaktens endelige dimensioner.

### Grænseflader

For at sammensætte modulerne er det nødvendigt at betragte deres interfaces med andre moduler og med de eksterne omgivelser. Den vigtigste faktor for, hvordan modulerne indbyrdes kan placeres i forhold til hinanden, er dog modulernes interfaces med de eksterne forhold. Eksempelvis skal ventilationskanalen monteres til en stikledning, der går ind til lejligheden. Stikledningen er en Ø 160 mm rørkanal. Rørkanalen bevirker, at der ikke kan sættes andre moduler imellem ventilationsmodulet og baderummet. Det vil sige, at der for alle moduler skal tages hensyn til, at der skal trækkes stikledninger ind til lejligheden.

Skaktelementerne er af samme type op gennem hele etagebyggeriet. Rør, kanaler osv. har altså samme diameter i interfacet mellem top og bund af elementerne. Rørene samles ved hjælp af samlemuffer og standardiseret værktøj. Derfor skal der være plads til at benytte disse værktøjer i skakten. Det bevirker, at der opstår yderligere constraints knyttet til sammensætningen af moduler i skakten. Der er i denne afhandling fokuseret på skaktelementernes opbygning, og derfor tages der ikke yderligere højde for samlingsmuffer og andre mindre elementer.

### Arketyper for badeværelser

I forbindelse med arbejdet med badeværelseskonfiguratoren blev det konstateret, at det ikke vil være muligt at håndtere en fri placering og kombination af elementerne i badeværelset med et traditionelt konfigureringsystem. Fokus for denne del af arbejdet er på skakten, og for at undgå at integrere forskellige typer af teknologi, er der valgt samme princip som i den tidligere beskrevne arketype konfigurator.

### Udviklingen

For hver arketype af badeværelse udregnes et minimumsareal for skakten, baseret på, at alle føringer antager mindst mulige dimensioner. Det vil sige, at den enkelte arketypes areal beregnes ud fra minimumsmålene gange en faktor, hvis føringerne er større end minimum.

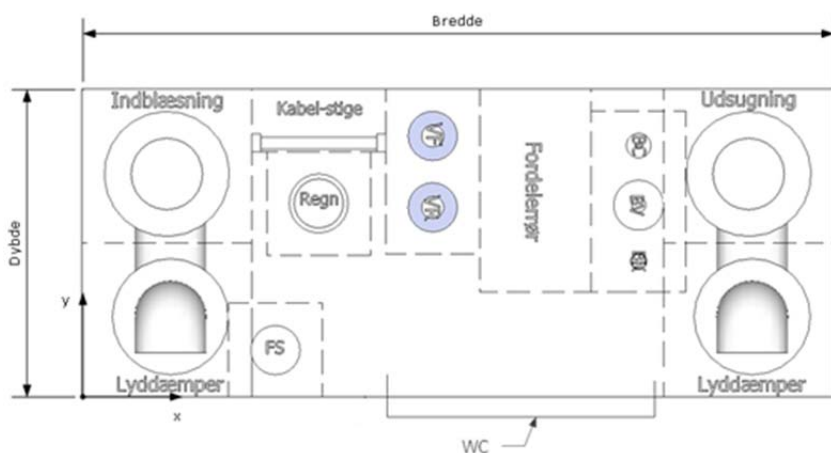
For at udvikle arketyperne er de mulige kombinationer af moduler i skakten identificeret. Skakten skal indeholde en af to typer ventilation. Desuden kan tagvandsafløb og kabelstige til- eller fravælges. Dette medfører otte forskellige arketyper for skakten, se Figur 44.

	Kontroludsugning	Balanceret ventilation	Tagvandsafløb	Kabelstige
1. arketype	X			
2. arketype	X		X	
3. arketype	X			X
4. arketype	X		X	X
5. arketype		X		
6. arketype		X	X	
7. arketype		X		X
8. arketype		X	X	X

Figur 44 Kombinationer af moduler



De øvrige moduler vil altid være en del af skakten. Ud over de otte nævnte kombinationsmuligheder er toilettets placering i forhold til faldstammen begrænsende for arketyperne. Faldstammen skal altid placeres inderst mod væggen til baderummet. For at kunne tilslutte toilettet til faldstammen placeres faldstammen enten 200 mm til højre eller venstre for toilettet. Faldstammen flyttes vilkårligt efter toilettets placering i x-retningen jf. Figur 45.

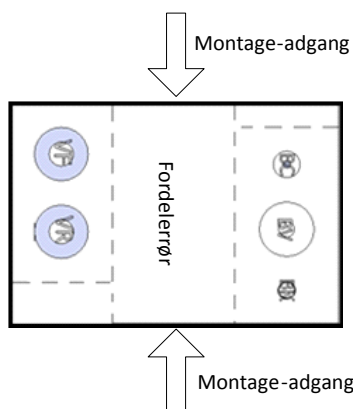


Figur 45 Placering af WC

### Varme- og brugsvandplacering

Efter antallet af arketyper er fastlagt, kan modulernes placering i arketyperne bestemmes. Modulerne skal placeres således, at de kan monteres, serviceres og i øvrigt overholde respektgrænserne. Et af de vigtigste elementer under montagen af skaktelementet er tilslutningen af brugsvand og varme til lejligheden. Fra skaktelementet tilsluttes hver lejlighed med et antal PEX-rør, som fordeler vand- og varme i lejligheden. PEX-rørene er fleksible og kan derfor forholdsvis ubesværet monteres til fordelerrørene. Dog skal montøren have adgang til fordelerrørene under montagen. Derfor skal de lodrette rørføringer ikke besværliggøre montagen af PEX-rørene. Ligeledes har NCC et krav om, at det skal være muligt at efterspænde fordelerrørssamlinger, aflæse målere og lukke for ventiler fra en servicelem placeret over toilettet. Hvis toilettet er placeret langt fra fordelerrørene, vil servicen ikke være mulig. Derfor spejles arketyperne, så der fremkommer i alt 16 forskellige arketyper.

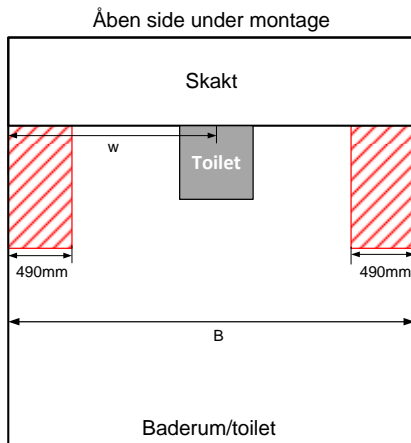
Kravet fra montage og kravet fra service bevirker, at der skal være adgang til fordelerrørene fra begge sider. Dette løses ved at placere varmemodulet overfor brugsvandsmodulet og imellem disse gøre plads til fordelerrørene. Herved er det muligt at montere alle PEX-rør, samtidig med at fordelerrørene optager mindst mulig plads i skakten, da de er indbyrdes forskudt i forhold til hinanden. De to elementer er på den baggrund samlet til ét vandmodul som anvendes i alle arketyperne, se Figur 46.



Figur 46 Montage og service af vandmodulet

### Faldstamme til spildevand

Som tidligere nævnt er toilettets placering afgørende for placeringen af faldstammen. Den skal derfor kunne flyttes efter toilettets placering. Derfor skal der i skakten være plads langs væggen ind mod baderummet til at placere faldstammen vilkårligt. Eneste begrænsning er, at toilettet ikke må placeres tættere end 490 mm fra nærmeste hjørne, da der ellers ikke er plads til at sidde på toilettet. Toilettets placeringsmuligheder fremgår af Figur 47.



**Figur 47 Toilettets placeringsmuligheder**

### Kabelstigen

Det skal være muligt at trække ledninger op langs kabelstigen igennem hele byggeriet. For at lette kabelføringen skal kabelstigen være let tilgængelig. Kabelstigen placeres, så der er direkte adgang fra den åbne væg, se Figur 47. Kabelstigen placeres, hvor den vurderes at være til mindst gene for øvrige moduler. Kabelstigen er forholdsvis åben, og det er derfor muligt at stikke værktøj og lignende igennem kabelstigen under montagen af bagvedliggende moduler.

### Balanceret ventilation og tagvandsafløb

Den balancerede ventilation er opdelt i to moduler, som placeres i hver ende af arketypen. Det letter montagen af skaktelementerne betragteligt, da to store kanaler ved siden af hinanden ville besværliggøre montagen.

Regnvandsafløbet kan stort set frit placeres i arketypen, da det ikke har nogen tilslutninger til den enkelte lejlighed. Derfor skal der ved placeringen af regnvandsafløbet kun tages hensyn til, at det er muligt at samle skaktelementerne i top og bund.

### Anvendelse af modulerne

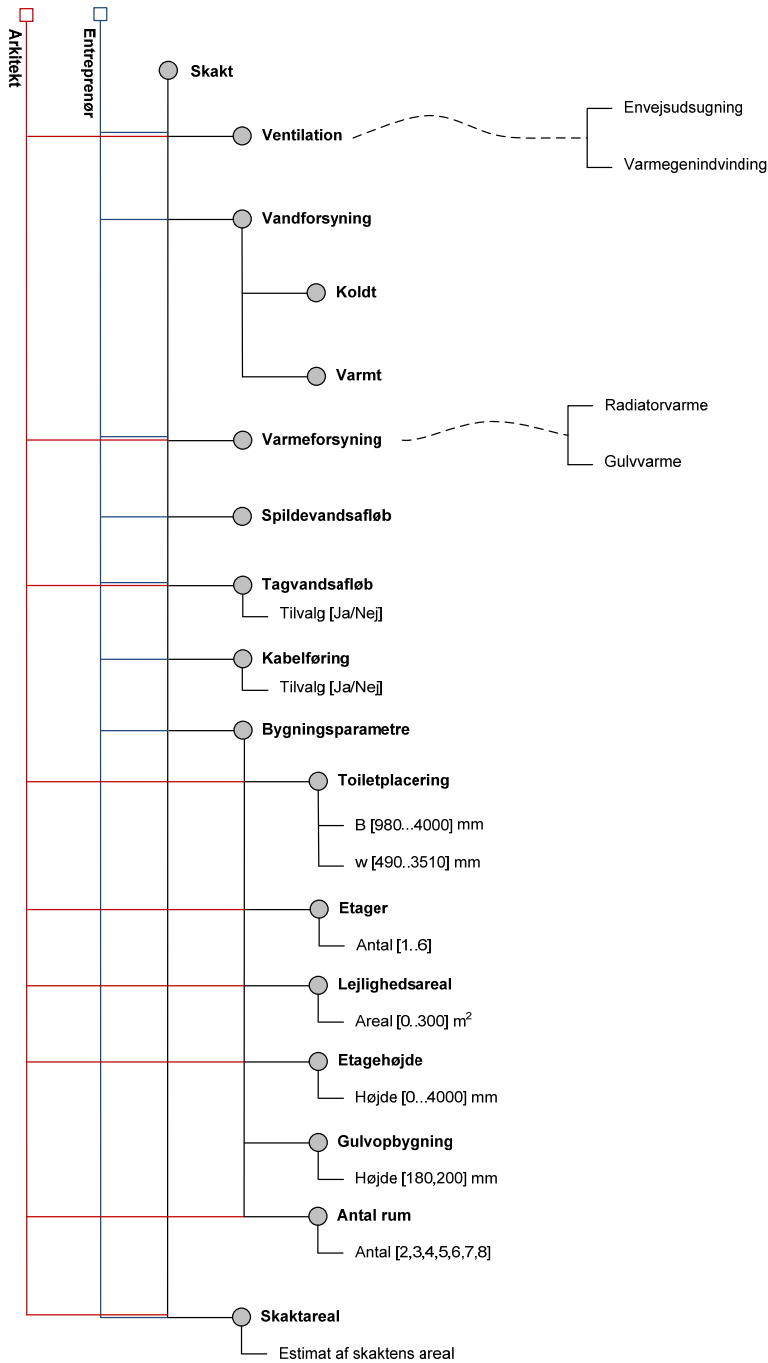
På baggrund af det beskrevne er de 16 arketyper udviklet. Det er sket i dialog med NCC, som vurderer, at de vil dække hovedparten af de behov, der er i forbindelse med etageboligbyggeri. Arketyperne lægges ind i konfigureringsystemet, og ud fra de valg, kunden foretager, udvælges og dimensioneres en passende arketype.

Skakten består således af et antal moduler, der udfører hver deres funktion. Skaktens layout bestemmes af den overordnede arkitektur dvs. af valget af arketype.

For at danne et overblik over produktprogrammet er oplysningerne samlet i en Produkt Variant Master, som beskriver modulerne og de 16 arketyper ud fra tre synsvinkler; customer view, engineering view og part view. For at øge overskueligheden af Produkt Variant Masteren suppleres med CRC-kort i de tilfælde, hvor der er behov for større detaljering.

## Produkt Variant Master

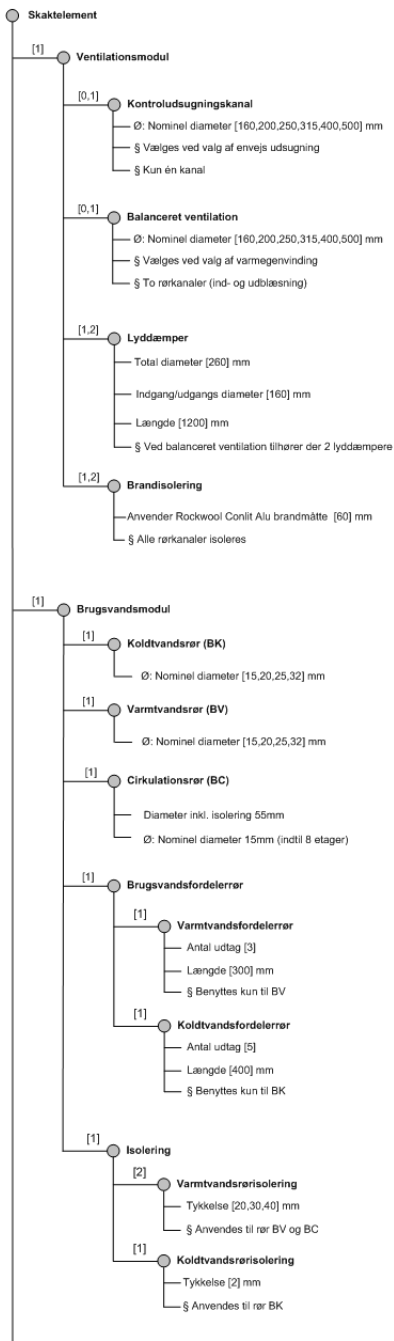
### Customer view



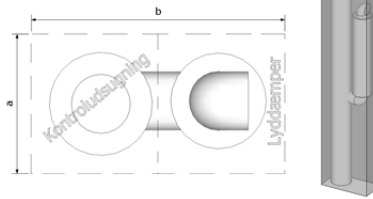
Figur 48 Customer view

Customer viewet illustrerer de parametre, der er interessante for kunden, se Figur 48. Kunden er dog ikke helt entydig i denne sammenhæng, da skakten har en række interessenter (kunder), så som arkitekter, ingeniører, entreprenøren, myndighederne, bygherre, driftsherre og bygningens kommende beboere. Myndighederne har eksempelvis indirekte interesse i skakten, idet bygningen skal opfylde lovkrav og energinormer. I opbygningen af customer viewet er der valgt kun at fokusere på dem, der er udpeget som de vigtigste interessenter, nemlig arkitekten og entreprenøren. Begge disse interessenter har interesse i, at byggeriet er fuldt funktionsdygtigt. Entreprenøren har dog en større interesse i detaljerne, hvor arkitektens fokus mere er rettet mod de overordnede dele såsom de ydre dimensioner. På baggrund af dette er customer viewet opdelt, så det viser de to interessenters forskellige fokusområder.

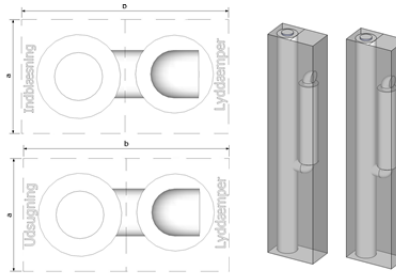
# Engineering view



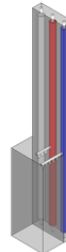
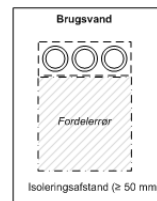
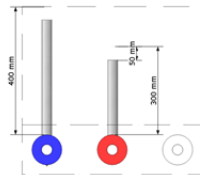
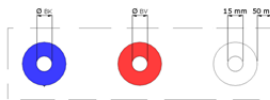
Kontroludsugning:



Balanceret ventilation:



\*\* Bemærk a15 er minimum \*\*  
\*\*Bemærk der regnes ikke med samtidighed\*\*

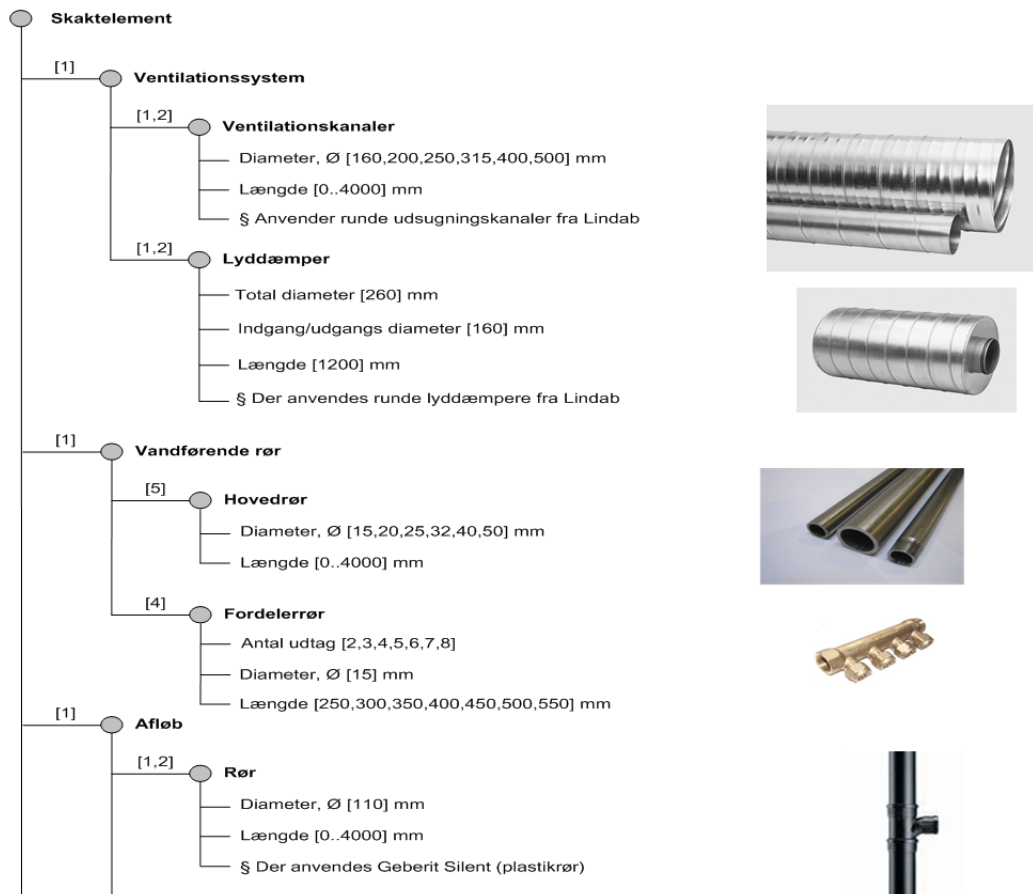


Figur 49 Udsnit af Engineering view

## Part view

Fra dette view skabes et overblik over de forskellige funktioner, som modulerne har, se Figur 49. Klasserne er defineret ved en beskrivelse, attributter og constraints. For eksempel angiver klassen *varmtvandsrør* bl.a. de størrelser, røret kan fås i.

For nogle klasser er der faste normer for, hvordan modulet dimensioneres, hvorimod andre klasser kræver adskillige udregninger for at dimensionere modulet. Arkitekturerne beskriver, hvordan modulerne kan kombineres og placeres. Regneregler kunne være placeret i engineering view, men for overskuelighedens skyld er de angivet på CRC-kort.

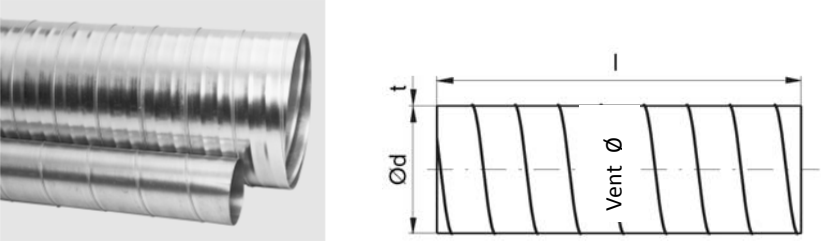


Figur 50 Part view

Part view indeholder de væsentlige komponenter, der indgår i installationsskakten, se Figur 50. Dog er selve rammen af afgrænsningsmæssige hensyn ikke medtaget. Generelt indeholder part viewet den nødvendige viden til at generere en styklister og dermed, hvilke komponenter der skal anvendes i produktionen.

## CRC-kort

Til at understøtte engineering viewet, se Figur 49, benyttes CRC-kort til bl.a. at beskrive regler for dimensionering af modulerne. Der anvendes kun CRC-kort for de moduler, hvor informationen af plads- og overskuelighedshensyn ikke kan placeres på Produkt Variant Masteren, se Figur 51.

Klassenavn: Kontroludsugningskanal	Dato: 9/6- 2010	Forfatter/version:
Klassens opgave (responsibilities): At dimensionere ventilationskanalens diameter ud fra byggeriets størrelse.		
Aggregering		Generalisering
Superparts: Ventilationsmodul		Superklasser:
Subparts:		Subklasser:
Skitse:		
		
<b>Attributter:</b> Ventilationskanalens diameter: $Vent\_Ø [160, 200, 250, 315, 400, 500]mm$ Den beregnede maksimale luftstrøm: $q_{max} [float] l / s$ Antallet af etager: $e [1, 2, 3, 4, 5, 6]$ Antallet af kvadratmeter pr. etage: $etage\_kvm [20..300]m^2$ Antallet af ventilationsrør: $qty_{vent} = 1$		Klassen samarbejder med:  Ventilationsmodul Lyddæmper Brandisolering
<b>Systemmetoder:</b>		
<b>Produktmetoder:</b> $H_{vis} \text{ etage\_kvm} < 160m^2 \Rightarrow$ $q_{max} = e \cdot 55 l / s$ $H_{vis} 160m^2 \leq \text{etage\_kvm} \leq 300m^2 \Rightarrow$ $q_{max} = e \cdot (55 + (\text{etage\_kvm} - 160) \cdot 0,35)$  Ventilationskanalens diameter vælges ud fra tabellen:          Mindst tilladelige kanal vælges.		

Figur 51 CRC-kort for kontroludsugningskanal

## Fase 3 og 4 – Programmering og test

Programmeringen er foregået i en successiv proces, hvor der først er etableret en meget simpel konfigurator. Denne er så udvidet trinvis for til sidst at indeholde de ønskede funktioner. Det successive forløb har givet mulighed for en løbende dialog med henholdsvis arkitekter og skaktekspertes hos NCC. Deres input er løbende vurderet og implementeret i konfiguratoren.

Programmeringen er foregået på baggrund af kravspecifikationen, Produkt Variant Master samt CRC-kort. Produkt Variant Masteren og CRC-kort har en objektorienteret struktur, hvilket har lettet overgangen til Tacton, idet Tacton også er objektorienteret i sin opbygning.

## Den endelige prototype

Hovedfunktionaliteten af de to konfiguratorer, arkitekt- og skaktekspertkonfiguratoren, vil blive gennemgået på de kommende sider.

### Arkitektkonfiguratoren

På første side indtaster arkitekten information om bygningen samt lejlighedernes størrelse og udformning, se Figur 52. I den udviklede prototype er etageantallet begrænset til maksimalt 6, arealet pr. etage til maksimalt 300 m<sup>2</sup> og antallet af rum til maksimalt 8. Undervejs er der mulighed for at fremkalde forskellige hjælpepetekster.

Figur 52 Arkitektkonfigurator - side 1

Når data er indtastet vælges "next" i øverste højre hjørne. Herefter skal arkitekten vælge, om byggeriet anvender varmegenindvinding eller ej, se Figur 53. For at lette arkitektens valg er der gjort brug af standardværdier. Standardværdierne er bestemt af skakteksperten. Det betyder, at hvis arkitekten er i tvivl, kan han/hun bibeholde standard værdien og trykke på "next".

Figur 53 Arkitektkonfigurator - side 2

Outputtet fra denne del af konfiguratoren er en skitse af skaktens geometri samt dens dimensioner. Desuden er der på skitsen også angivet, hvilken væg der skal være åben, og på hvilken væg toiletet skal placeres i forhold til skakten, se Figur 54.

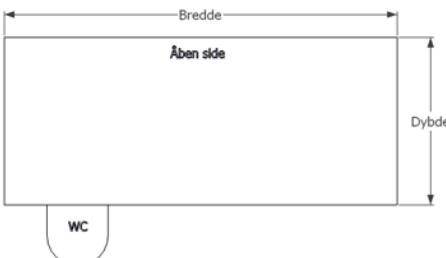
## Arkitekt-konfigurator

Optimize Previous Ok Cancel

1 Step 1 > 2 Step 2 > 3 Skakt

Færdig skakt

RESULTATER



Skakt dybde [mm]: 769

Skakt bredde [mm]: 1.867

Skakt areal [m<sup>2</sup>]: 1.435

Skaktens geometri kan ikke ændres uden samtale med ingeniør

Færdig skakt

Figur 54 Arkitektkonfigurator - Output

### Skaktekspertkonfiguratoren

Først skal skakteksperten indtaste de samme parametre, som arkitekten skulle på første side. Desuden skal der indtastes flere tekniske parametre såsom gulvopbygningens højde, bredden af baderummet m.fl., se Figur 55.

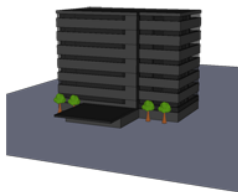
## Skaktekspert-konfigurator

Optimize Next Cancel

1 Step 1 > 2 Step 2 > 3 Skakt

Byggeparametre

BYGNINGSPARAMETRE

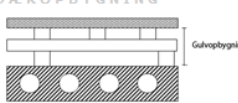


Antal etager: 4

Etage højde [mm]: 3500


Kvm. pr. lejlighed: 60

DÆKOPBYGNING



Gulvopbygning [mm]: 200

LEJLIGHEDSPARAMETRE



Toiletet skal placeres min. 490mm fra begge væghjørner

Antal rum i lejligheden: 3

Bredde af baderum [mm]: 2000

Toilet placering [mm]: 800

Byggeparametre

Figur 55 Skaktekspertkonfigurator - side 1

På konfiguratoren næste side skal der indtastes/vælges, hvilken type af ventilation der skal benyttes, hvordan huset skal opvarmes, samt om skakten skal indeholde kabelstige og afløb til tagvand, se Figur 56.




**1**  
Step 1

**2**  
Step 2

**3**  
Skakt

**Skakt indhold**

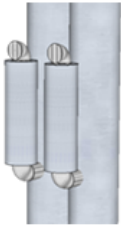
**VENTILATION**




Ventilationstype

Kontrol udsugning

Balanceret ventilation




**VARME**




Varmtype

Gulvvarme

Radiatorvarme



**TAGVAND**

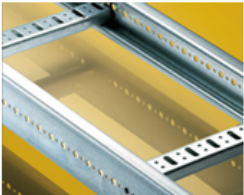


Tagvand

Nej

Ja

**KABELSTIGE**



Kabelstige

Nej

Ja

**Skakt indhold**

Antal etager: 4

Etage højde [mm]: 3,500

Antal rum: 3

Kvm pr. etage [m<sup>2</sup>]: 60

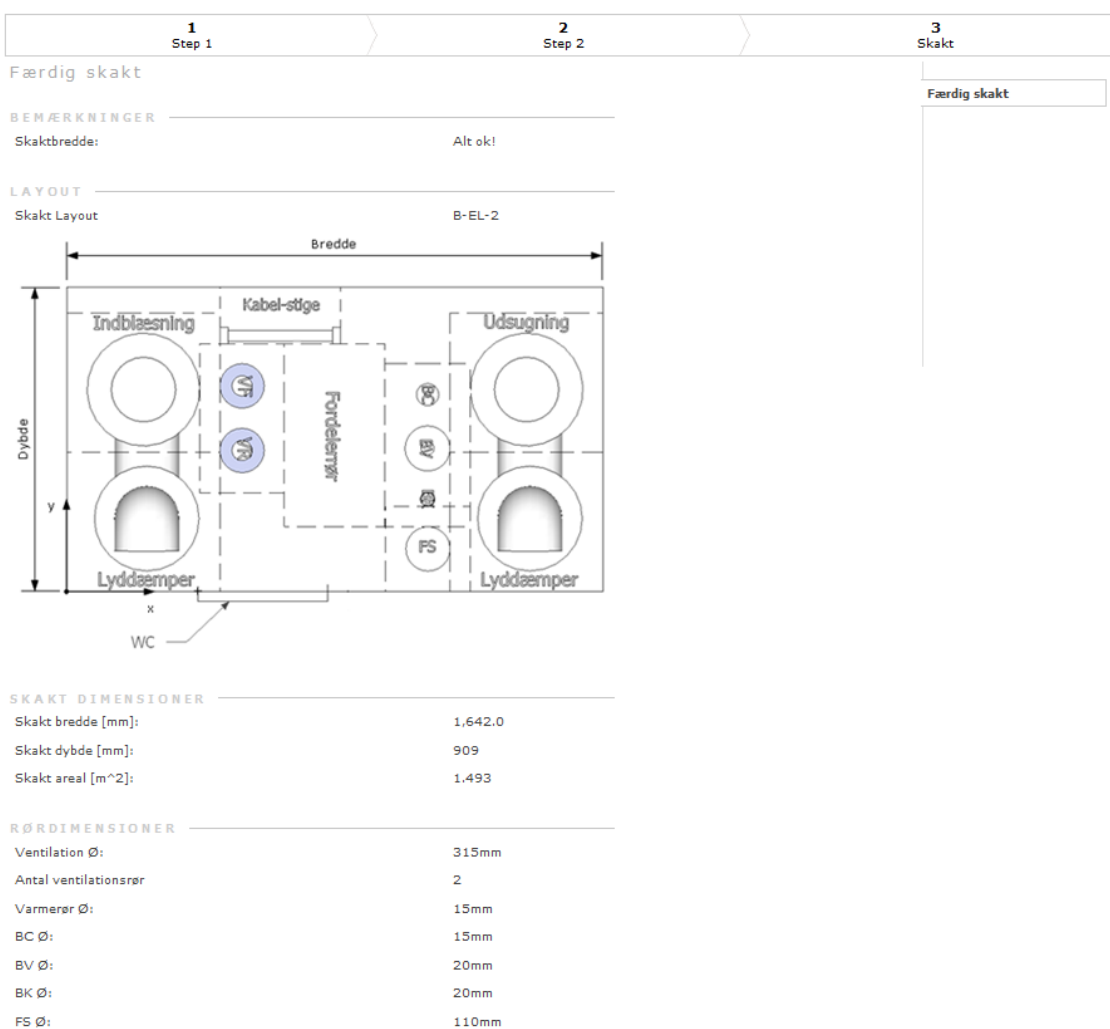
Bredde baderum [mm]: 2,000

Toilet placering [mm]: 800

Gulvopbygning [mm]: 200

Figur 56 Skaktekspertkonfigurator - side 2

Når parametrene er valgt trykkes "next". Konfiguratoren leverer herefter et output i form af en skitse af arketyper, beregning af rørdiameter, beregning af isoleringstykkelser og beregning af rørens indbyrdes placeringer. Figur 57 viser et uddrag af outputtet.



Figur 57 Skaktekspertkonfigurator - Uddrag af output

### Evaluering

De interviewede ingeniører hos NCC var positivt overraskede over skaktekspertkonfiguratoren og mente, at den opbyggede prototype kan være med til at illustrere mange af de fordele, der kan opnås gennem produktkonfigurering. Overordnet havde ingeniørerne dog et ønske om en mere geometrisk orienteret konfigurator, hvilket ikke har været muligt at realisere i Tacton. Ingeniørerne ønskede også at konfiguratoren på sigt kan give CAD-tegninger og styklister.

De to interviewede arkitekter fra NCC mente også, at arkitektkonfiguratoren har et potentiale. Dog var der stor usikkerhed angående konfiguratoren tekniske inputs. Arkitekterne mente ikke, de har grundlag for at vurdere byggeriets tekniske parametre og vil derfor ofte vælge at lade default-værdierne stå. En ekstern arkitekt, som også har fået fremvist konfiguratoren, mente dog, at man som arkitekt bør kunne svare på de stillede spørgsmål, selv om de har en vis teknisk karakter. Under fremvisningen blev vigtigheden af at kunne ændre på skaktens geometri pointeret. Denne funktion er ikke medtaget i prototypen, men er afgørende for at arkitekterne vil anvende konfiguratoren i fremtiden.

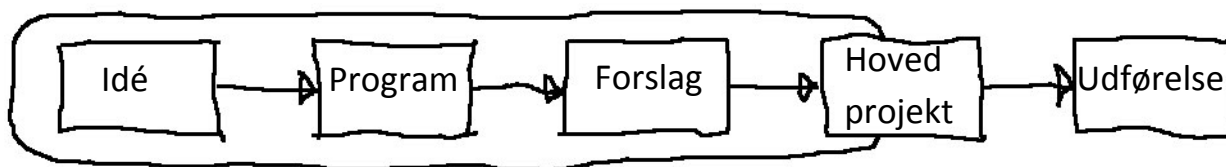
## Top-down konfigurator

I visionen fremsættes en hypotese om, at der kan opnås gevinster i byggeriet ved at anvende et konfigureringsystem i forbindelse med det overordnede løsningsvalg i de tidlige faser. Hypotesen er baseret på, at FLS har opnået gode resultater i salgs- og designprocesserne, ved i sin tilbudsgivning at anvende et konfigureringsystem. [Kjærgaard, 1955]. Dette projekt fokuserer på at afprøvemulighederne for at udvikle et sådant konfigureringsystem i en byggevirksomhed.

Der har været tale om et kombineret arbejde, som både har fokuseret på forskningsspørgsmålet, dvs. mulighederne for at anvende konfigurerings-systemer, og på mulighederne for trinvis implementering. I dette afsnit fokuseres på udviklingen af konfigureringsystemet. Yderligere information om top-down tilgangen kan ses under spørgsmål 3: Hvilke metoder kan anvendes til at implementere moduler trinvist i en entreprenørvirksomhed?.

Den udviklede konfigurator kan på et overordnet niveau håndtere løsningerne i etagebolig- og kontorbyggeri. Konfiguratoren kan i forbindelse med kundedialogen i de tidlige faser anvendes som en guide, der sikrer, at relevante spørgsmål i forhold til udformning, funktion, økonomi mm. stilles. På baggrund af de stillede spørgsmål kommer konfiguratoren med en række anbefalinger til løsninger, og dermed opnås større grad af sikkerhed for, at den bygning, bygherren og tilbudsgiver kommer frem til, overholder krav og ønsker fra bygherren, lokalplanen og lovgivningen.

Konfiguratoren kan foranledige ændringer i processerne i særlig idé-, program- og forslagsfaserne, se Figur 58. Disse indledende faser smelter sammen og får karakter af én fase, et forhold der skal reducere antallet af loops samtidig med, at konfiguratoren skal højne vidensniveauet og give et bedre løsningsvalg.



Figur 58 De indledende faser smelter sammen og får karakter af én fase

Som for de øvrige arbejder er dette indledt med at indsamle informationer og strukturere dem i en Produkt Variant Master (PVM). Denne PVM adskiller sig lidt fra teorien ved at indeholde en overordnet og en mere detaljeret udgave af henholdsvis customer- og engineering view, men ikke noget part view. De to views, customer- og engineering-, er valgt for at skabe en tæt sammenhæng til konfigureringsystemet. Metoden fungerer ved, at der først tages stilling til en række spørgsmål i det overordnede customer view og herefter i det overordnede engineering view. På baggrund af disse valg bliver man ført tilbage i et mere detaljeret customer view og derefter i et mere detaljeret engineering view. Årsagen til, at part viewet er udeladt, er, at der ikke opnås et tilstrækkeligt detaljeringsniveau. Begge niveauer holder sig således på et forholdsvis abstrakt niveau, ud fra princippet om en top-down tilgang.

## Udvikling af konfiguratoren

Ved udviklingen af konfiguratoren er elementer fra Produkt Variant Masteren (PVM'en) trinvist blevet implementeret og testet. Et eksempel er størrelsen af teknikrummene. Det er et spørgsmål, som kræver indsigt i de tekniske installationer, og som derfor normalt først fastlægges, når kompetencer indenfor disse områder inddrages i processen.

### Teknikrum

Inden teknikrummets størrelse bestemmes, skal der først træffes beslutning, om bygningen skal være naturlig eller mekanisk ventileret; hvis naturlig vælges, skal der ikke bruges et teknikrum til ventilation. Hvis der vælges mekanisk ventilation, skal der tages stilling til, om man skal have et system bestående af *Constant Air Volume* (CAV) eller *Variable Air Volume* (VAV). Dette bestemmes i denne sammenhæng ud fra rummets anvendelse og dermed belastning. Ved en høj belastning vælges VAV, og luftbehovet sættes til  $5 \frac{m^3}{t \cdot m^2}$ . Ved lav belastning vælges CAV, og behovet for luft sættes til  $10 \frac{m^3}{t \cdot m^2}$ . Dette skal sammenholdes med at man skal bruge ca.  $5 m^2$  teknikrum for hver  $1.000 m^3$  luft, der skal skiftes i timen.

Herudover skal bygningens etageareal (A) kendes. Fra dette areal trækkes 20 %, som antages at være ikke-ventilerede arealer eller arealer med eget ventilationsanlæg. Det kan eksempelvis være trapperum.

På den baggrund kan størrelsen af teknikrum bestemmes.

$$\text{Teknikrummets størrelse} = \frac{(A - 20\%) \times X}{1.000 \frac{m^3}{t}} \times 5m^2$$

## Beskrivelse af konfiguratoren

På de kommende sider er der en gennemgang af en række af de trin, der gennemgås i konfiguratoren samt af outputtet fra dem.

Konfiguratoren er opbygget, så man starter i det store perspektiv med de ydre påvirkninger af bygningen, f.eks. fra lokalplanen. Herefter bevæger man sig for hvert *step* længere og længere ind mod bygningens centrum.

Det første trin, man møder, når man kører konfigurationen, er "Introduktion og forklaring af Konfigurator"-*steppet*. Her kan brugeren læse, hvad han kan forvente af konfiguratoren, se Figur 59.

### Introduktion og forklaring af Konfigurator

#### Introduktion og forklaring

Denne konfigurator er tænkt som et værktøj i opstartsfasen af et nyt byggeprojekt. Konfiguratoren kan hjælpe brugeren med at stille de rigtige spørgsmål og få overblik over hvilke konsekvenser et evt. valg har på andre faggrupper, eller hvem og hvad der påvirkes af et givent valg. Enheder er angivet i [ ].

Next >

#### Disclaimer

Denne konfigurator er kun tænkt som et vejledende værktøj; svar og konklusioner må aldrig ses som endegyldige. Ethvert svar eller output fra konfiguratoren bør altid kontrolleres og verificeres af en relevant fagtekniker før brug.

Figur 59 Step 1, Introduktion, forklaring og disclaimer i konfiguratoren

Dette step er indført for at afstemme brugerens forventninger, så denne ikke tror, at konfiguratoren i sin nuværende udformning er den endegyldige; snarere en version på vejen mod en mere udbygget udgave. Efter brugeren er introduceret til konfiguratoren og disclaimeren, kan der gå videre til næste *step*.

I *step 2* skal der i den første *gruppe* afgives nogle overordnede oplysninger om bygningen, eks. om det er et kontor eller boligbyggeri. Se Figur 60.

The screenshot shows a web-based configuration interface. The left panel, titled "Indledende valg", contains several sections: "Beslutninger vedrørende lokalplanen" with a dropdown for "Bygningstype" (set to "Kontor"), "Varmeforsyning" with a "Ja" button, "Der skal nu tages stilling til hvilke uddybende parametre der ønskes besvaret" with three "Ja" buttons, and "Teknikrum" with a "Ja" button and a "Nej" button. The right panel, titled "Bygningens type og ønskede tilpasningsevne", contains "Udformning af rådhuset" with "Opbygning af facader" (set to "Lukkede/Tunge") and "Opbygning af arealer" (set to "Opdelte/Lav tilpasningsevne"), and "Bygningsreglement" (set to "BR2010").

Figur 60 Step 2, Lokalplan og Tilpasningsevne

For at gøre det muligt for brugere med forskellig faglig baggrund og viden at anvende konfiguratoren, skal man i den anden *gruppe* vælge hvilke områder, der ønskes taget stilling til. Det kan være spørgsmål vedrørende varmforsyningen, bygningens højde og teknikrummets placering. Et andet område, hvor konfiguratoren tilpasses, er i forhold til ventilation. Hvis bygningstypen bolig vælges, vil man, da der for boliger næsten altid anvendes *Constant Air Volume* (CAV), ikke efterfølgende blive spurgt, om der ønskes *Variable Air Volume* (VAV) eller CAV ventilation. Denne form for "konfigurering af konfiguratoren" finder sted flere gange igennem de forskellige steps.

Herudover skal man bl.a. træffe beslutning om facadens opbygning, arealernes opbygning samt hvilket bygningsreglement, man ønsker overholdt. For facaden kan der vælges "lukkede/tunge facader" eller "åbne/lette facader". På samme måde kan der for arealer vælges "opdelte/lav tilpasningsevne" eller "åbne/stor tilpasningsevne". Disse to valg er bestemmende for, hvor store muligheder der er for at lave om i facaden, og om arealerne opdeles af bærende søjler eller vægge. For bygningsreglementet figurerer der to muligheder. Man kan vælge BR2010, alternativt BR2015. Dette valg har indflydelse i de senere *steps* på bygningens isoleringstykkelse og u-værdier.

På denne måde gennemløbes i alt ni trin, hvor der afgives forskellige oplysninger om bygningen. Neden for vises step syv som et eksempel, se Figur 61. Her skal man tage stilling til tre forskellige grupper af spørgsmål, som alle omhandler indeklimaet. I første grupe skal man tage stilling til nogle

parametre, som har indflydelse på typen af ventilation i bygningen. Man skal, som tidligere nævnt, ikke skal tage stilling til dette for boliger, fordi boliger næsten altid bruger et CAV system.

Ud fra et antal parametre, f.eks. om bygningen ligger nær forurenende elementer, hvad etagehøjden er, og om der er mere end én medarbejder pr. 10 m<sup>2</sup>, kan det afgøres, om der kan anvendes naturlig ventilation, eller om mekanisk ventilation skal anvendes.

### Hvilket ventilationsprincip skal benyttes

Følgende parametre påvirker valg af ventilationsprincip	Valg af specielle arealer	Påvirkninger af ventilationsmængde
Hvor stor en andel af bygningen er kontor [%] ? <input type="text" value="76"/>	Der kan herunder foretages forskellige tilvalg i forbindelse med "specielle" områder inden for ventilation. Tilvalg af "specielle" områder vil ikke påvirke den generelle ventilationsløsning, men vil blot resultere i en opsøring af typiske løsninger for ventilation i disse områder. Vil der være auditorier i byggeriet kræver disse en særlig kraftig ventilation (stempe) da der til tider vil være en stor koncentration af mennesker i lokalet.	Der bør aldrig være lufthastigheder over 0,15 [m/s] i opholdszoner hvor der udføres stillesiddende arbejde. Som grundlæggende værdier bør ventilationen ikke stige mere end: 30-35 dB i sturumskontorer, 40dB på toiletter og i teknikum og 25-30 dB i mødelokaler.
Ligger bebyggelsen i en byzone (tæt på områder med stor forurening eller lugt gener)? <input type="button" value="Nej"/>	Auditorier eller produktionslokaler: <input type="button" value="Nej"/>	Hvilken indeklimastandard ønskes overholdt: <input type="button" value="A"/>
Består bebyggelsen hovedsageligt af callenumkontorer? <input type="button" value="Nej"/>	I parkeringskælder er der brug for særlig ventilation for at forhindre forurening samt for at kunne styre en evt. rågdudvikling.	Der tages udgangspunkt i et enkeltmandskontor med 10 m <sup>3</sup> pr person. Grundet valg af klimaklasse A kan der regnes med en maksimal utilfredshed på 15%.
Er der flere end én medarbejder per 10 m <sup>2</sup> eller er der en særlig stor varmeudledning fra eksempelvis meget udstyr? <input type="button" value="Nej"/>	Parkeringskælder: <input type="button" value="Nej"/>	Maximalt CO2 niveau: 700ppm
Hvad er rumhøjden (fra gulv til loft)? <input type="text" value="270"/>	Mødelokaler: <input type="button" value="Nej"/>	Total luftmængde i lavt forurenede bygning [(l/s)/m <sup>2</sup> ]: 3,0
Fra tidligere valg er etagehøjden valgt til: <input type="text" value="270"/>		

<< Back   Next >>

Figur 61 Step 7, Ventilationsprincip

I Trin 10 vises resultatet af konfigurationen, se Figur 62. For de dele af konfiguratoren, der fungerer som tjekliste, vises de afgivne oplysninger direkte. For de øvrige dele vises mere eller mindre analytiske resultater.

Resultater		Resultater		Resultater	
<b>Statistik system</b>	Resultat for det statiske system: Bærende vægge og lukkede/tunge facader samt kerner.	<b>Overordnet ventilationsprincip</b>	Naturlig eller mekanisk ventilation kan bruges alt afhængigt af andre variable, på toiletter skal der dog være mekanisk ventilation.	<b>Antal skakte:</b>	0.44
<b>Opbygning:</b>	Ved konstruktionen af et råhus for kontorer vil der normalt blive lagt af på facaden.	<b>Ventilationsprinciper der skal benyttes i særlige områder af bygning:</b>		<b>Skakte for CAV er normalt 12 m<sup>2</sup>/stk store, er der mere end et heltal ganges det overskydende med 12 m<sup>2</sup> (fx 2.2 skakte bliver til to skakte af 12 m<sup>2</sup>*0.2 = 2.4 m<sup>2</sup>).</b>	
<b>Varmeforsyning:</b>	Fjernvarme skal bruges til opvarmning. Ved valg af vedvarende energi som varmforsyning kan den gennemsnitlige produktion trækkes fra det samlede energiforbrug ved forholdet 1-1 ifølge BR2015.	<b>Fra indeklimaklassen vides at:</b>	Der bør aldrig være lufthastigheder over 0,15 [m/s] i opholdszoner hvor der udføres stillesiddende arbejde. Som grundlæggende værdier bør ventilationen ikke stige mere end: 30-35 dB i sturumskontorer, 40dB på toiletter og i teknikum og 25-30 dB i mødelokaler. Grundet valget af klimaklasse A kan der regnes med en maksimal utilfredshed på 15%.	<b>Afstand fra terræn til øverste dæk [m]:</b>	7.09
<b>Ifølge lokalplanen skal:</b>	Teknikrum skal installeres inden for klimaskærmen, normalt i kælderen.	<b>Der vil max være et CO2 niveau 700ppm på:</b>		<b>Der er ingen ekstra krav til det statiske system for bygninger hvor det øverste dæk er under 12m fra terrænet.</b>	
<b>Det generelle føringsprincip er:</b>	El føres normalt i loft og installationskanaler langs vægge; ventilation føres normalt i sænkede lofte. Varmekilder (Radiatorer) placeres normalt i bygningen under vinduer, denne placering giver større fremtidig fleksibilitet da man sjældnere vil flytte et vindue end en væg, og radiatoren vil derfor ikke ende med at stå op af en væg er skal fjernes.	<b>Total luftmængde i lavt forurenede bygning [(l/s)/m<sup>2</sup>]:</b>	3,0	<b>Brandmodstandsevne for bygninger hvor øverste etage er højst 12 m fra terrænet, skal bygningen opretholde R60, hvilket vil sige, at nøglelementerne skal bevare deres stabilitet selvom sekundære bygningsdele mister deres stabiliserende egenskaber tidligere end 60 minutter.</b>	
<b>Gode råd til placering af bygning</b>	I forbindelse med placeringen af bygningen bør nabobygningers højde inddrages, idet de kan skygge for lyset og på den måde mindske lysindfald.	<b>Føring af el installationer:</b>	El installationer skal føres i gulv og kræver der er plads, dette kan fx løses ved brug af strå gulv.	<b>Tykkelse af tung facade [m]:</b>	0.435
<b>Gode råd til mængde og placering af glas i facader.</b>	Mængden af glas påvirker energigrænse og lysindfald meget forskelligt alt efter hvilken type glas der benyttes. De begrænsende faktorer er: ifølge lovgivningen skal der være min 2% dagslys på arbejdsstationer, dette udregnes vha. computer simulering (DIBS), der skal kompenseres vha. køling ved for meget varme, påvirker det samlede energiforbrug pr. m <sup>2</sup> . Lysindfaldet = "lux inde"/"lux ude" på en skyet dag skal der derfor være min. 200 lux inde på arbejdsplads, da der udenfor er ca. 10.000 lux: 200/10.000=0.02 = 2%.	<b>Estimeret størrelse på teknikum</b>	Hvilken type ventilation ønskes? <input type="button" value="CAV"/>	<b>U-værdi for tung facade [W/m<sup>2</sup>K]:</b>	0.104
	Udregning af nedvendig køling pga. lysindfald sker på baggrund af, at der på solrige dage ca. strømmer 730 W/m <sup>2</sup> ( med et refleksionstab på 15-20%) som betyder at der strømmer 584 W ind ad vinduer. Hvis vinduet har en gennemstrømningsfaktor på 0.25 reduceres dette til ca. 146 W. Dette skal fjernes vha. afkøling!	<b>Størrelse af teknikum [m<sup>2</sup>]:</b>	20.00	<b>Tykkelse af tag [m]:</b>	0.58
	Ideelt bør der i erhvervsbyggeri tilstræbes en glasandel i facaderne på ca. 15-20%. Placeringen af glasset er ud fra reglen om at der skal være 40% mod nord, 25% mod hlv. øst og vest samt de resterende 20% mod syd. Dette afhænger dog meget af herlighedsfaktorer som udsigt, der kan ændre i den foretrukne fordeling!	<b>Antallet af teknikum kan variere alt efter afstand mellem skakterne. Er afstanden større end 40 m mellem to skakte kan det blive nødvendigt med to separate teknikum. Normalt har erhvervsbygningers teknikum en højde på 3.5-4 m</b>		<b>U-værdi for tag [W/m<sup>2</sup>K]:</b>	0.104
		<b>Estimer på mængde af elementer samt pris</b>	Det anslås at der skal bruges, antal elementer [stk]: 100	<b>Økonomi</b>	
		Der kan regnes med at huldekket koster omkring DKK 300 pr. stk, samt at det koster ca. DKK 90-100 at lægge det. Et tykkere dæk medfører en højere pris.	Prisen for at lofte elementerne på plads vil være ca. [kr]: 60000	<b>Du har valgt at der skal være: Mellem geometri, mellemstyr facade og mellemstyr aptering/komplementering.</b>	
				<b>Geometrien af en bygning behøver ikke at have en stor betydning på prisen, dog kan små tolerancer og mange "ikke lodrette" flader resultere i besværlig montering af facader.</b>	
				<b>Prisen på facader afhænger af flere parametre, der blandt valg af materiale (kobber er dyrere end aluminium og beton), måden hvorpå det monteres (kommer det i færdige sandwich elementer er det billigere end hvis det kommer i mindre stykker der skal sættes på facaden ved håndkraft), hældning og form af overflade (hælder væggen udad skal der understøttes indtil facaden sidder fast desuden vil specielle geometrier resultere i mindre tolerancer).</b>	
				<b>Onkostninger til aptering/komplementering afhænger af materialevalg, placering (kan det monteres af en person der står på fast overflade eller skal det løftes højt op), mængden af aptering/komplementering frem for malede overflader.</b>	
				<b>De samlede omkostninger til el installationer:</b>	520000
				<b>De samlede omkostninger til vvs:</b>	520000
				<b>De samlede omkostninger til ventilation:</b>	756000
				<b>De samlede omkostninger til installationer:</b>	1796000

<< Back

Figur 62 Step 10, Resultater

Den første gruppe viser, hvilket statisk system der typisk vil blive brugt, ud fra valgene for facade og bærende elementer i step 2, samt om bygnings-typen er kontor eller bolig. Herudover præsenteres de valg, der blev truffet for varmforsyningen, teknikummet samt hvilket føringsprincip, der normalt benyttes. Til sidst gives nogle gode råd og retningslinjer til, hvad man skal tage højde for ift. bygningens placering, og ift. mængden og placeringen af glas i facaderne. Dette kan have stor betydning for bygningens energiforbrug.

Den anden gruppe præsenterer først resultatet for ventilationsprincippet. Er der særlige rum, præsenteres typen af ventilation i disse rum også. Efter typen af ventilation gives forklaring på, hvilke parametre, der typisk påvirker valget af ventilation, og hvad man skal være opmærksom på i forbindelse med konstruktion af ventilationsanlæg. Efter præsentation af disse gode råd, forklares de normale føringsveje for elinstallationer i bygningen. Ud fra valg af ventilationstype, CAV eller VAV, estimeres teknikrummets størrelse. Desuden forklares om typiske afstande fra teknikrum til skakte.

Den sidste gruppe forklarer, hvor mange skakte, man kan forvente, beregnet på baggrund af bygningens areal og antallet af etager. Desuden forklares om skaktenes størrelser. Det forklares hvilke krav, der er til brand og bæreevnen i det statiske system på baggrund af højden fra terræn til toppen af øverste dæk. Til sidst præsenteres en række økonomiske forhold. Først præsenteres de valg, der blev taget mht. pris i forhold til kompleksiteten og kvaliteten af geometri, facade og aptering. Derefter forklares, hvad der påvirker prisen, og hvad man skal tage højde for, når man projekterer de forskellige dele. Til sidst opsummeres den forventede pris for en bygning af den i trin 5 valgte størrelse. Forventningen er baseret på tidligere projekter og på de valg, der er truffet for geometri, facade og aptering i *step 3*.

Efter dette *step* er det muligt, efter en udbygning af konfiguratoren, at sende projektet videre til projektering således at de forskellige dele kan beregnes mere præcist. Konfiguratoren vil i den forbindelse sikre, at man er kommet igennem alle relevante spørgsmål i den indledende fase, samt at man har taget højde for de forskellige entrepriser, der skal detailberegnes.

## Evalueringsskriterier for konfiguratorens potentialer

Evalueringen af potentialet ved at implementere et konfigureringsystem af den beskrevne type hos NCC er foretaget ud fra otte kriterier. De første fire kriterier er brugt til at bedømme FLS udvikling af en konfigurator til brug ved tilbudsgivningen for cementfabrikker [Hvam, 2006, 1]. Herudover er der brugt fire kriterier, der ikke er brugt eksplicit i evalueringen af FLS, men som indgår implicit i artiklens tekst. De fire ekstra kriterier ser på forhold, der kan forbedre de efterfølgende processer. Det giver følgende otte kriterier, som vil blive brugt til at evaluere konfiguratoren.

- 1- Potentialet for at mindske gennemløbstiderne for byggeprojekter.
- 2- Potentialet for at mindske ressourceforbrug i forbindelse med byggeprojekter.
- 3- Potentialet for at komme med tilbud på flere byggeprojekter.
- 4- Potentialet for at øge kvaliteten af tilbud i byggeprojekter.
- 5- Potentialet for at mindske risici ved byggeprojekter.
- 6- Potentialet for større modularisering.
- 7- Potentialet for at vise sammenhænge og konsekvenser.
- 8- Potentiale for større struktur

Evalueringen efter de otte kriterier tager udgangspunkt i de erfaringer, der er gjort igennem udviklingen af prototypen, samt i en række interviews med potentielle brugere og fagpersoner hos NCC.

1 - Potentialet for at mindske gennemløbstiderne for byggeprojektet er vigtigt, da det forventes, at NCC herved vil kunne vinde flere projekter. Det skyldes enhver investors ønske om et hurtigt *return on investment* (ROI) - jo hurtigere et byggeprojekt gennemføres, des hurtigere kan bygningen tages i brug og derfor begynde tilbagebetalingen af investeringen. Desuden vil kortere gennemløbstider også gøre det muligt for den samme mængde ansatte i NCC at gennemføre flere projekter.

2 - Potentialet for at mindske ressourceforbruget vil give NCC en fordel i forhold til konkurrenterne, ved at kunne gennemføre flere projekter med det samme ressourceforbrug. Dette kan udnyttes til enten at sænke priserne på byggeprojekter eller at øge profitten ved at gennemføre byggeprojekter.

3 - Potentialet for at komme med tilbud på flere forespørgsler gør, at NCC får mulighed for større markedsandel. Det kan opnås, da der i dag sorteres i de projekter, der afgives tilbud på, så der kun afgives tilbud på projekter, der vurderes mest profitable. Potentialet for at afgive flere tilbud resulterer derfor i et potentiale for at tage markedsandele fra konkurrerende virksomheder, der ellers ville have vundet pga. NCC's manglende tilbud.

4 - Potentialet for at øge kvaliteten af tilbud og af byggeprojekter, vil give NCC fordele, idet en bedre kvalitet af tilbud vil mindske risikoen for tab i forbindelse med fejlbehæftede tilbud. Desuden vil en bedre kvalitet af byggeprojekter gøre det muligt at mindske spild fra fejl og uforudsete udgifter. Potentialet for flere projekter og større markedsandele på baggrund af kundetilfredshed og bedre omdømme ses også som en afledt faktor bør indgå i bedømmelsen.

5 - Potentialet for at øge strukturen af tilbud og arbejds gange vil give NCC en mere ensartet måde at løse opgaverne på, hvormed antallet af snublesten mindskes. Det bliver muligt at have én standardiseret arbejds gang, hvorved det bliver nemmere og hurtigere at oplære nye folk. Desuden vil en struktureret arbejds gang resultere i hurtigere byggeri, da der kan oparbejdes en rutine og erfaring inden for strukturen.

6 - Potentialet for at vise sammenhænge og konsekvenser vil give NCC en klar fordel, da man tidligere end i dag kan vise bygherre, hvilke konsekvenser der vil være ved forskellige valg, samt hvad der vil ske, hvis disse beslutninger ændres.

7 – Potentiale for at mindske risici ved byggeprojekter kan opstå igennem muligheden for at få et overblik over de forskellige løsninger, og hvordan de overlapper. Et sådant overblik kan benyttes til at minimere antallet af løsninger og derfor også mængden af snublesten, da der bliver færre måder, hvorpå ting skal kommunikeres og gøres. Desuden kan klarere definerede projekter, igennem større struktur, mindske snublesten igennem bedre kommunikation.

8 - I forbindelse med udarbejdelsen af en konfigurator vil der være et potentiale for at udvikle nogle standardmoduler til brug i modulbaserede byggerier. Dette potentiale vil komme til udtryk igennem løsninger, der genbruges og optimeres, således at de byggetekniske løsninger bliver bedre, end de er i dag. En sådan modularisering vil desuden gøre det muligt at videreudvikle modulerne og derigennem forbedre mulighederne for konfigurerbare løsninger i NCC.

## Vurdering af konfiguratorens potentiale

Konfiguratorens potentiale er evalueret inden for de førnævnte kriterier. Evalueringen sker på baggrund af interviews med fagfolk samt ud fra de erfaringer, der er indsamlet under arbejdet med prototype konfiguratoren. Evalueringen af potentialet ved at anvende en konfigurator hos NCC sammenholdes med de resultater, FLS har opnået, som beskrives i "Mass customization of process plants" [Hvam, 2006, 1].

**Tabel 10 Effekter ved anvendelse af konfigurator hos F.L.Smith og NCC**

	FLS <sup>1</sup>	NCC
1- Gennemløbstider	Betragtelig reduktion	Betragtelig reduktion
2- Ressourceforbrug	Reduktion på 50 %	Nogen reduktion
3- Tilbud	Alle forespørgsler får tilbud	Mindre stigning
4- Kvalitet	Mere homogene og med bedre kvalitet	Mere homogene og med bedre kvalitet
5- Struktur	Langt større struktur	Langt større struktur
6- Sammenhænge og konsekvenser	Nemmere at vise konsekvenser for kunden	Nemmere at vise konsekvenser for kunden
7- Risici	Betragteligt reduceret	Betragteligt reduceret
8- Modularisering	Stor grad	Mindre grad

Evalueringen i Tabel 10 viser, at der på en række områder er potentielle gevinster ved at anvende et konfigureringsystem af den beskrevne type hos NCC. De største potentielle gevinster ligger i et optimeret procesflow, med deraf følgende reduktioner i ressourceforbrug og kalendervarighed. Flowet vil samtidig kunne struktureres bedre, end hvad der er tilfældet i dag. Dette kombineret med, at der kan inddrages mere viden tidligt i processen er medvirkende til at reducere risici.

Udover de potentielle gevinster er der også fundet en række barrierer, der skal overvindes. De væsentligste forhindringer ligger i, om der er tilstrækkelig mange projekter, der passer til det område, konfiguratoren dækker. Og om konfiguratoren i tilstrækkelig grad kan danne grundlag for en efterfølgende modularisering og ensretning af løsninger. Dette er forhold, der vil give gevinster uden for de faser, konfiguratoren dækker. Sidstnævnte har netop været en af de store gevinster hos FLS.

Mulighederne for at modularisere er sammenlignet med FLS. Sammenligningen er vanskeliggjort af det forhold, at elementerne i et byggeri har en meget tæt både funktionel og fysisk integration og dermed mange og kraftige relationer imellem bygningsdelene(modulerne). Dertil skal lægges de arkitektonisk og æstetiske hensyn, som også ofte fokuserer på helheden. Samlet set gør det det vanskeligt at arbejde med princippet om en én-til-én sammenhæng mellem et modul og en funktion. [O'Brien, 1998]. Det gør samlet set en bygning væsentligt vanskeligere at modularisere end en cementfabrik. I modsætning hertil kan FLS opdele sine cementfabrikker i en række mindre dele, moduler, som leverer en given funktion, og som har faste måder at interagere med de øvrige moduler på. Rent fysisk består disse grænseflader ofte af transportbånd og snegle, en langt løsere kobling, end hvad der er brug for i forhold til bygningsdele.

Herudover er der gennem arbejdet set et behov for at finde metoder til at kvantificere de forskellige ønsker og krav, som kunder har til byggerier. Disse kundekrav varierer væsentlig mere og dækker langt flere forhold, end hvad der ses hos FLS. Det gør det vanskeligt at foretage en regelbunden optimering af et byggeri. Hos FLS fokuserer kundens krav og ønsker, udover de tidsmæssige og økonomiske, meget på forhold som kapacitet og energiforbrug. Denne type af krav kan i langt højere grad kvantificeres, sammenlignet med de langt mere subjektive krav og ønsker, der stilles til et byggeri – såsom det arkitektoniske udtryk.

## Besvarelse af spørgsmålet ”Hvordan kan konfigureringsystemer anvendes i en entreprenørvirksomhed?”

Vi har i dette arbejde udviklet tre prototypekonfigureringsystemer, som viser, hvordan der er mulighed for at anvende konfigureringsystemer i en entreprenørvirksomhed. En række forhold har i den sammenhæng gjort sig gældende. Det er vigtigt, at konfiguratoren bliver anvendt tidligt i projektet for dermed at sikre, at der vælges løsninger, der ligger inden for løsningsrummet. Valget af teknologi har vist sig vigtigt, da forskellige teknologier giver forskellige muligheder og restriktioner. Det har vist sig vanskeligt at etablere et endeligt løsningsrum, et forhold der er særlig vigtigt, når der anvendes traditionel konfigurerings teknologi. Udfordringerne med at etablere et endeligt løsningsrum eller på forhånd at have det fulde kendskab til produktet har vist, at det kan være nødvendigt, at lægge et abstraktionsniveau ind imellem det konfigurerede og det endelige produkt. Endelig at har det været en udfordring, at byggerier på én gang er meget regelbundne og komplekse, men samtidig har en stærk subjektiv side i forhold til at opfylde kundens ønsker og behov, forhold der ikke kan løses som en logisk/matematisk opgave.

### Vurdering af pålidelighed

De anvendte oplysninger er alle baseret på arbejder udført som en del af dette projekt. I forhold til top-down konfigureringen gælder de sammen forhold omkring generalisering, som tidligere er beskrevet i forbindelse med besvarelse af spørgsmål 3: Hvilke metoder kan anvendes til at implementere moduler trinvis i en entreprenørvirksomhed? I forhold til bottom-up-tilgangen ses her en abstraktion imellem dele af det konfigurerede nemlig den del der har kundens interesse, og det produkt NCC ønsker at sælge. Denne abstraktion menes dog ikke at adskille sig fra, hvad der findes for andre bygningsdele. Det er ofte ikke den enkelte bygningsdel eller systemleverance, der interesserer kunden, men derimod den funktion eller sammenhæng, produktet indgår i og som derfor ønskes konfigureret.

### Detalldiskussion

Spørgsmålet er vidtfavnende og kan i praksis ikke besvares fuldstændigt. I arbejdet er der derfor især fokuseret på to hovedaspekter i spørgsmålet. Hvordan kan konfigureringsystemer anvendes ved trinvis implementering af moduler og standardløsninger? Dvs. produkter, der jfr. Module Application Matrix ikke er fuldt modulariserede, eller produkter hvor modulerne kun er delvist detaljerede. Herudover er der fokuseret på, hvordan forskellige teknologier kan håndtere konfigurering af sådanne produkter. Der har været tale om action research, hvor fokus har været på at udvikle eksempler på konfigureringsystemer. Der er i arbejdet udviklet tre prototyper på konfigureringsystemer, to der fokuserer på enkeltdele af bygningen i form af henholdsvis installationsskakte og badeværelser, og en der fokuserer på det overordnede løsningsvalg for hele bygningen. På baggrund af de gennemførte arbejder kan det konstateres, at det er muligt at udvikle og anvende konfigureringsystemer i en entreprenørvirksomhed. Procesmæssigt er det hensigtsmæssigt, at konfigureringsystemet anvendes fra det øjeblik, hvor beslutninger eller løsningsdesign påbegyndes inden for det område, konfigureringsystemet dækker. Dette for at undgå, at der vælges løsninger, der ligger uden for konfigureringsystemets løsningsrum, et forhold der vil kunne forhindre, at konfiguratoren efterfølgende inddrages. I arbejdet med badeværelseskonfiguratoren stræbes efter en løsning, hvor konfiguratoren udvikles af entreprenøren der, hvis denne inddrages, først inddrages senere i processen. Arbejdet viser, at dette stiller krav til konfiguratoren, dels i forhold til frihed i designet, dels i forhold til en enkelt, elegant og intuitiv brugergrænseflade. Endelig er der krav om, at resultatet af konfigurationen kan overføres til de forskellige IT systemer, som brugerne måtte anvende. Disse krav kan vanskeliggøre udviklingen. Der er således et misforhold mellem at anvende en konfigurator, der har til formål at skabe ensartede og hensigtsmæssige løsninger på tværs af en hel portefølje af projekter, og en konfigurator, i badeværelsestilfældet en ekstern konfigurator, der har til formål at optimere den individuelle designopgave i det enkelte projekt. Dette misforhold kan komme til udtryk ved, at brugeren alene ønsker at pålægge sig de af regler og normer givne restriktioner, mens udbyderen af konfigureringsystemet, producenten, i forhold til regler og normer kun har et indirekte ønske gennem brugen, men til gengæld har nogle andre ønsker om restriktioner, motiveret af at holde løsningen inden for hans produkts løsningsrum. Dette viser en problemstilling i forhold til gevinsthjemtagningen hos byggeriets parter. Brugeren af konfigureringsystemet får ikke nødvendigvis del i de gevinster, der er i det efterfølgende produktionsled. Fokus er her en effektiv designproces og på frembringelsen af et produkt design, der er optimalt på de områder, brugeren bliver målt på. Set fra producentens synspunkt er det vigtigt, at brugen af konfigureringsystemet leder forholdsvis direkte hen til brug af hans specifikke produkt.

Muligheden for at ensarte løsninger på tværs af en portefølje af projekter har været et centralt mål for de udviklede prototypekonfiguratorer, der alle er baseret på traditionel konfigureringssoftware. Visionen og den bagvedliggende litteratur går ikke i detaljer mht. hvilken teknologi, der tænkes anvendt til at udvikle de ønskede konfigureringsystemer. Det kan enten hænge sammen med, at det tages for givet, at der anvendes traditionel konfigurerings teknologi. Dette er tilfældet for FLS casen. [Hvam, 2006, 1]. Det kan også skyldes, at der simpelthen ikke er taget stilling til hvilken teknologi, der skal anvendes. Arbejdet med badeværelseskonfiguratoren viser, at det er vigtigt at overveje nøje hvilken teknologi, der bedst opfylder formålet samt de krav, der stilles til konfigureringsystemet. Ud fra, at der i visionen er fokuseret på traditionelle konfigureringsystemer, er der også i arbejdet med prototype konfiguratorer særligt fokuseret på, hvordan traditionel konfigurerings teknologi kan tilfredsstille de ønsker, der er for anvendelse af konfigureringsystemer i byggeriet. Det er allerede konstateret, at det er muligt at udvikle konfigureringsystemer til byggebranchen med brug af sådanne teknologier. Men det ses også, at det kan være vanskeligt at etablere et endeligt løsningsrum inden for de beskrevne områder. Nemtest har det været for installationsskakten. Der har her været tale om et rent teknisk produkt, der skal tilfredsstille en række specifikke krav. Kravene kan beskrives med nogle faste parametre, som varierer inden for et forholdsvis veldefineret spænd. Vanskeligere bliver det, når vi ser på badeværelset. Her er der til sammenligning langt flere regler og normer, der tilmed i et vist omfang kan til- og fravælges. Desuden er der et ønske om at tilfredsstille flest muligt individuelle funktionelle og arkitektoniske behov og ønsker. Her er der som udgangspunkt ikke noget endeligt løsningsrum. Det samme gør sig gældende for top-down konfiguratoren, hvor det er den samlede bygning, der konfigureres. I begge tilfælde har



fraværet af det endelige løsningsrum for slutproduktet, gjort det nødvendigt at indlægge et abstraktionsniveau mellem brugerens ønsker, som de udtrykkes i en Produkt Variant Master's (PVM's) customer view, og det der skal produceres i form af slutprodukt, svarende til part view i en PVM.

Dette ekstra abstraktionsniveau er håndteret på hver sin måde i henholdsvis badeværelses- og top-down konfiguratoren. I badeværelses konfiguratoren er det konfigurerede resultat, i form af arketyperne, en forsimplet udgave af resultatet, som efterfølgende skal tilpasses til det ønskede resultat. For top-down konfiguratoren er outputtet et overordnet løsningsvalg, svarende til engineering view i en PVM. Metoden har således gjort det muligt at anvende traditionel konfigurerings teknologi uden at etablere et endeligt løsningsrum.

At det ikke er lykkedes at etablere en række standardiserede løsninger med et detaljeringsniveau, der gør, at det kan anvendes som produktionsgrundlag, betyder ikke, at dette ikke vil være muligt. Men det ses, at der inden for byggeriet som udgangspunkt er en stor varians – en varians, der delvist er drevet af, at alle byggerier har en unik placering og af, at der i branchen ikke er tradition for at udvikle ensartede løsninger, der kan tilfredsstille individuelle behov.

Ved at tilføje det beskrevne abstraktionsniveau imellem det konfigurerede og det byggede, reduceres en af de væsentlige gevinster ved at anvende konfigurerings teknologi. Mens selve projekteringen godt kan effektiviseres, både i forhold til omkostninger og kvalitet, vil der ikke opnås det fulde potentiale under udførelsen. Der vil fortsat være en stor varians, som forhindrer, at der kan blive tale om fuld industrialisering. Det er dog også vist, at der kan tages skridt i retning af industrialisering, og at de første skridt i en trinvis implementering er farbare.

## Del 6

# Konklusion

Gennem dette projekt er der gennemført en række arbejder med det overordnede mål at ny-industrialisere byggebranchen for derved at opnå bedre og billigere byggerier. Baseret på en række litteratkilder er der opstillet en vision for, hvordan ny-industrialiseringen kan realiseres gennem anvendelse af modularisering, produktfamilier og konfigureringsystemer – dette samlet i systemleverancer baseret på princippet om Mass Customization. Det har givet det overordnede forskningsspørgsmål "Hvordan kan Mass Customization og de underliggende teorier, i en dansk kontekst, realisere visionen om industrialiseret arkitektur, med anvendelse af systemleverancer?".

Det overordnede forskningsspørgsmål er efterfølgende underopdelt, konkretiseret og prioriteret i en række underliggende forskningsspørgsmål, som er besvaret. Spørgsmålene har på flere områder fokuseret mere på at skabe forståelse og teoriudvikling, og derved har de en mere grundlæggende karakter end det mål, der fokuseres på i visionen. Det hænger sammen med, at den bag visionen liggende litteratur i vid udstrækning har fokuseret på arkitektoniske aspekter og ikke i detaljer har inddraget de teorier og metoder, der er udviklet i produktionsindustrien.

Besvarelsen af forskningsspørgsmålene har vist, hvordan det historiske byggeri efter Den Københavnske Byggelov kan beskrives som bestående af moduler. Men det vises også, at disse moduler afviger en del i forhold til byggeri fra perioden med modul- og montagebyggeri, der normalt trækkes frem, når der tales om modulariseret byggeri. Det ses også, hvordan de historiske moduler både omfatter organisation, kompetencer, processer, materialer og selve løsningerne. Denne bredere opfattelse er særlig interessant, når der ses på den måde, moduler indgår i forskellige typer af produkter. Ved at anvende forståelsesrammen Module Application Matrix kan man se, at etagebyggeri modulariseres på en anden måde, end man typisk ser inden for produktionsindustrien. Det er inden for produktionsindustrien, de anvendte teorier om modulariseringen og konfigurering, efter principperne om Mass Customization er udviklet. Forskellen i modularisering, kan ses både i forhold til hvor stor en del af slutproduktet, der er opbygget af moduler og hvor detaljeret beskrivelserne af modulerne er. Disse forhold repræsenterer to forskellige måder at implementere moduler trinvist på. Men der er også tale om tilgange, der kan kombineres. Den ene er en top-down tilgang, hvor hensigten er at modularisere hele eller store dele af bygningen, men hvor modulerne kun defineres på et overordnet niveau. Den anden er en bottom-up tilgang, hvor der fokuseres på enkeltdele i bygningen, hvor disse enkeltdele gives en høj detaljeringsgrad. Behovet for at arbejde med delvis modularisering og mindre detaljering adskiller byggebranchen fra den produktionsindustri, hvori og til de anvendte metoder til modularisering, produktfamilier og konfigureringsystemer er udviklet. Til trods herfor er det vist, at der også i byggeriet er mulighed for at udvikle og anvende konfigureringsystemer og at systemerne både kan understøtte en top-down og en bottom-up tilgang til modularisering. Behov for et meget stort løsningsrum stiller dog nye og anderledes krav til konfigureringsystemerne. I produktionsindustrien har man traditionelt foretaget en konfigurering, for derved som output fra konfigureringsystemerne at få et fuldstændigt design og måske endda et fuldstændigt produktionsgrundlag. Dette sker i en Configure to Order (CTO) proces. Når der arbejdes med delvis modularisering, vil der være behov for at indlægge et yderligere designarbejde, efter konfigureringen er foretaget, en proces der kan betegnes som Configure to Engineer to Order (CTETO).



## Perspektivering og fremtidig F&U

Gennem dette projekt er der, under hensyntagen til de forskelle, der er imellem byggeriet og produktionsindustrien, påvist en række muligheder for at øge anvendelsen af moduler og konfigurering i byggeriet. Der er skabt en forståelsesramme i forhold til trinvis implementering af moduler, og fokus er rettet mod en bredere opfattelse af, hvad moduler kan bestå af, en opfattelse der går ud over den traditionelle fokusering på de fysiske dele af slutproduktet. Disse resultater kan, kombineret med det øvrige teorigrundlag, direkte bruges i virksomheder, der ønsker at arbejde med at indføre moduler. Den bredere opfattelse og den trinvis implementering viser også, at det ikke nødvendigvis kræver, at der etableres et stort offsite produktionsapparat, der kan producere præfabrikerede moduler. I den danske byggebranche, der består af mange små og mellemstore virksomheder, og hvor selv de største sidder på meget små markedsandele, ligger der i den bredere forståelse og tilgang en mulighed for at mange virksomheder kan indføre principperne om modularisering, produktfamilier og konfigurering.

Den udvidede forståelsesramme og måden at implementere moduler på stiller en række krav til metodeapparatet – krav, der endnu ikke er fuldt belyst og afklaret. Blandt disse er metodekrav til, hvordan moduler håndteres i en ikke fuldt modulariseret kontekst. Der vil i lang tid fremover være væsentlige og store dele af byggeriet, der designes og produceres individuelt til det enkelte byggeri. Samtidig vil udviklingen og designet af de moduler, der vil blive anvendt, være fordelt over en lang række parter, fra byggevarerleverandører til fagentreprenører. Da disse parter, og dermed de moduler, de designer, i et vist omfang vil skifte fra projekt til projekt, vil det ikke være muligt fuldstændigt at fastlægge og fastholde alle modulernes grænseflader. En mulighed kan være at arbejde mod en løsning, hvor der skabes og arbejdes med moduler, som i deres eksterne grænseflader kan håndtere en høj grad af fleksibilitet, en fleksibilitet, som end ikke er kendt når modulet designes. Dette skal ske på en måde, så de interne grænseflader og moduler i modulet kan fastholdes inden for et fastlagt løsningsrum. Man kan formulere det på den måde, at man skal være i stand til at håndtere "ukoordinerede moduler". I den forbindelse bør gevinstpotentialet medtages som en væsentlig del af arbejdet. Der er i dette projekt opstået en hypotese om, at der ved et byggeri med eks. 500 ukoordinerede moduler, er en mindre risiko for der er problemer med grænsefladerne end ved et byggeri med 5.000 eller 50.000 ukoordinerede elementer. Det kunne være relevant i et fremtidigt projekt at afprøve en mere stringent formuleret udgave af denne hypotese.

Andre områder, der inden for dette felt kunne forskes yderligere i, er de underforskningsområder, som i forbindelse med udvælgelsen af forskningsspørgsmålene til denne opgave blev skåret fra. Det drejer sig om spørgsmål inden for områderne arkitektur, organisation, jura og økonomi. I dette projekt har tilgangen været at starte med at skabe det tekniske grundlag og vente med de øvrige områder. Denne tilgang kan fortsættes ved at arbejde videre inden for de samme områder, som behandles i dette projekt, der har været rettet mod at skabe forståelse for og udvidelse af begreber og teorier, så de passer bedre ind i den byggek kontekst, vi i kender i dag. En anden tilgang kunne være at arbejde med arkitekturopfattelsen. I det materiale, der ligger til grund for dette arbejde, og som kommer til udtryk i visionen, er fokus i høj grad rettet mod den betydning og de muligheder, Mass Customization mm. giver i forhold til arkitekturen. Det er dog et element, som ikke har en central rolle i forhold til beskrivelse af de arkitektoniske forhold, men som er helt grundlæggende for at opnå de ønskede produktivetsgevinster. Dette element er porteføljetilgangen, muligheden for at anvende løsninger på tværs af en produktportefølje eller en produktfamilie. Der kunne arbejdes med hvordan arkitektoniske elementer kan anvendes på tværs af forskellige byggerier og dermed bryde med den udbredte sammenhæng, der er eller menes at være mellem unikke løsninger og god arkitektur. Der kunne arbejdes med, hvordan elementer kan genanvendes og højne den arkitektoniske værdi på tværs af for eksempel almindelige bolig- og kontorbyggerier. Om man også kan komme derhen, hvor man kan sætte den arkitektoniske kvalitet på formel og automatisk optimere den i et konfigureringsystem på linje med andre designparametre er nok tvivlsomt. Men at det er muligt at optimere den arkitektoniske designproces ved at anvende konfigurering og dermed variationer af løsninger på tværs af projekter, fremstår bestemt som en farbar vej, der kan udforskes og udvikles yderligere.

Et andet område, der med fordel kunne inddrages i forskningen, er muligheden for at kombinere modulariserede løsninger med den udbredte lean tænkning. Lean construction har i dag, i forhold til produktet, bevæget sig væk fra de oprindelige lean principper. Der synes at ligge et stort potentiale i at kombinere kendte løsninger med den evne til at håndtere den variation og uforudsigelighed, der er i udførelsen af et byggeri, som lean construction besidder. Det er et emne, som Svend Bertelsen introducerer i sit konference paper, *Modularisation - A Third Approach to Making Construction Lean* fra 2005 [Bertelsen, 2005]. Der er ikke er kendskab til at andre har arbejdet videre med dette emne siden.

Ud over det forskningsmæssige, er der et perspektiv, som kunne inddrages i arbejdet med den almene regulering af byggeriet. Vi ser i højere og højere grad, at reguleringen af byggeriet bliver udformet som funktionskrav. Dette ses f.eks. i forhold til brand og energi. Det er der mange gode argumenter for at gøre. Men set i forhold til mulighederne for at modularisere og udvikle systemleverancer, særligt med en bottom-up tilgang, kan fjernelsen af regulering, der alene retter sig imod enkelte elementer og ikke kombineres med andre krav, være en hæmsko for udviklingen. Et eksempel kunne være krav til u-værdier rettet direkte imod en enkelt bygningsdel, som f.eks. vinduer. En sådan regulering kan give en ren én-til-én sammenhæng mellem modulet og reguleringen. Dermed gøres byggeriet ikke rent administrativt mere systemisk og vanskeliggør således en modularisering, hvilket de funktionsbaserede krav kan gøre. Det har ikke været en del af dette arbejde at undersøge dette emne, og i forbindelse med reguleringen er der en lang række andre forhold, der skal tages med i overvejelserne. Det fremstår dog ikke, som om modulariseringsmulighederne har været en del af overvejelserne i forhold til den hidtidige udvikling, hvilket de bør være, hvis man ønsker, at byggeriet skal effektiviseres gennem det potentiale, i modularisering, systemleverancer og Mass Customization.

Udover det metode- og forskningsmæssige bidrag, kan arbejdet også danne baggrund for en mere operationel udvikling og implementering i branchens virksomheder. Rent teknisk og metodemæssigt har det vist sig at der er mulighed for, i højere grad end det allerede sker, at implementere moduler og konfigureringsystemer. For byggevarer leverandører og mindre virksomheder er det særligt bottom-up tilgangen der kan bruges til at udvikle systemleverancer inden for udvalgte områder. Her kan det være en mulighed at arbejde med den bredere modulopfattelse, som sås i det historiske byggeri og ikke nødvendigvis fokusere på præfabrikation.

I større produktions- og styringsvirksomheder kan de to tilgange kombineres. Det er vigtigt at ledelserne i virksomhederne har fokus på udviklingen, afsætter tilstrækkeligt med ressourcer og sikrer at udviklingen kommer hen over den implementeringsbarriere, der må forventes i et sådan udviklings- og forandringsprojekt. I forhold til ledelsesfokus kan der være en udfordring for bottom-up tilgangen, i og med at den i udgangspunktet kun fokuserer på en mindre del af det samlede produkt og selv væsentlige effektiviseringer kan virke ubetydelige i det store billede. Her vil det dog være vigtigt at fastholde fokus og se de enkelte detalj-udviklinger, som skridt frem imod en højere modulariseringsgrad for hele produktet. Top-down tilgangen er for større virksomheder meget attraktiv da den i udgangspunktet omhandler det samlede produkt, som er det kunderne efterspørger. Dermed kan denne tilgang bruges direkte i kommunikationen med kunden. Med NCC's præfabrikerede installationsskakt, som eksempel, så er det kun de færreste kunder der, medmindre de er meget driftsorienterede, vil interessere sig for hvordan installationsskakten i deres kommende bygning er opbygget.

Formålet med i højere grad at anvende moduler i byggeriet er at opnå en forbedring og dermed en gevinst i forhold til den nuværende situation. Dette arbejde har hovedsageligt fokuseret på at skabe det tekniske og metodemæssige grundlag for at anvende moduler i byggeriet. Der har således kun i begrænset omfang været fokus på at påvise en direkte værdiskabelse inden for byggeriet. Dette hænger bl.a. sammen med at værdien formuleres meget utvetydigt i de visioner der er formuleret for anvendelse af systemleverancer baseret på modularisering og Mass Customization, den effektivisering der blev opnået med modul og montage byggeriet og ikke mindst de erfaringer der er opnået i andre brancher. Uanset om en udvikling baseres på den ene, den anden eller en kombination af de to tilgange vil det være naturligt at stille krav om at påvise værdien. Når dette skal gøres vil det være vigtigt også at medtage de mere indirekte gevinster i form af mindre risiko og spild, herunder også de dele der naturligt indlægges i de nuværende processer og som opfattes, som en naturlig del af produktionen. Der er betydelige gevinster ved rent faktisk at bygge, som det er planlagt, uden eller med en reduktion af det "naturlige spild". Samtidig bør man også være opmærksom på den fordeling der vil være af gevinsten, det er således ikke sikkert at alle gevinsterne i starten vil tilfalde den part der har fortaget investeringerne. Der bør således skelnes imellem det at skabe en gevinst og det rent faktisk at høste den. Dette kan eksempelvis komme til udtryk ved at en fagentreprenør flere gange skal have oplevet en mere strømlinet byggeproces, før dette giver sig udslag i lavere tilbud. En oplagt måde med det samme at sikre sig gevinsten er via egenproduktion, men der kan også arbejdes med forskellige partnering modeller.

# Kilder

[Baldwin & Clark, 1997]

C. Y. Baldwin, K. B. Clark, "Managing in an age of modularity." Harvard Business Review, September-October: 84-93. 1997

[Beim et al., 2007]

A. Beim, K. S. Vibæk, T. R. Jørgensen, "ARKITEKTONISK kvalitet og industrielle BYGGESYSTEMER," Kunstakademiets Arkitektskole, CINARK, København, 2007.

[Bertelsen, 1997]

S. Bertelsen, "Bellahøj Ballerup Brøndby Strand, 25 år der industrialiserede byggeriet," Staens Byggeforskningsinstitut, Hørsholm, 1997.

[Bertelsen, 2005]

S. Bertelsen, "Modularization – A Third Approach to making construction lean," præsenteret ved 13. International Group for Lean Construction Conference, Sydney, Australien, 2005.

[Boër, 2006]

C. R. Boër, "A laboratory for industrial research on mass customization in the footwear industry," International Journal of Mass Customisation, Vol. 1, pp. 492-506, 2006.

[Boligministeriets Produktivitetsfundsudvalg, 1954]

Boligministeriets Produktivitetsfundsudvalg, "Boligbyggeriets produktionstekniske problemer," København: Teknisk Forlag, 1954.

[Bourke, 1998]

Rourke, R.: "Configurations, a status report," APICS – The Performance Advantage, May 1998.

[Byggecentrum, 2008]

Byggecentrum, "Bygningsrelementet 2008", Byggecentrum, Ballerup, 2008.

[Byggeriets Innovation, 2007]

Byggeriets Innovation, "Ud i det blå En innovationshistorie om Altan.dk," Byggeriets Innovation, København, 2007.

[Byggeriets Innovation, 2008]

Byggeriets Innovation, "På vej mod fremtidens skakt – En innovationshistorie om præfabrikerede installationskakte til etageboliger," Byggeriets Innovation, København, 2008.

[Dansk Standard, 2001]

Dansk Standard, "DS 3028:2001 - Tilgængelighed for Alle", København: Dansk Standard, 2001

[Doran & Giannakis, 2011]

D. Doran, M. Giannakis, "An examination of a modular supply chain: a construction sector perspective," Supply chain management: an international journal, vol. 16, Iss. 4, pp 260-270, 2011.

[DR Produktion, 2005]

DR Produktion, "Vi byggede Danmark Fra de danske entreprenørers og ingeniøres historie 1850-2005," Søborg: DR Produktion, 2005.

[Engelmark, 1993]

J. Engelmark, "Københavns etageboligbyggeri 1850-1900 En byggeteknisk undersøgelse," Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut.

[Eppinger, 2001]

S. D. Eppinger, "Innovation at the Speed of Information," Harvard Business Review, Vol. 79, Iss 1, pp. 149-158, 2001.

[Ericsson & Erixon, 1999]

A. Ericsson, G. Erixon, "Controlling Design Variants," Modular Product Platforms, Michigan, USA: Society of Manufacturing Engineers, 1999.

[Gharib & Nedelkovski, 2004]

H. Gharib, Saso Nedelkovski, "Industrialisering og innovation i byggesektoren," Eksamensprojekt, BYG.DTU, Danmarks Tekniske Universitet, Kgs. Lyngby, 2004.

[Girmscheid & Scheublin, 2008]

G. Girmscheid, F. Scheublin, "New Perspective in Industrialisation in Construction – A State-of-the-Art Report," IBB – Institut für Bauplanung und Baubetrieb, Zurich, 2010.

[Gottlieb, 2010]

S. C. Gottlieb, "The constitution of partnering," Ph.D. afhandling, Institut for Produktion og Ledelse, Danmarks Tekniske Universitet, Kgs. Lyngby, 2010.

[Harlou, 2010]

U. Harlou, "Developing product families based on architectures – Contribution to a theory of product families," Ph.D. afhandling, Department of Mechanical Engineering, Danmarks Tekniske Universitet, Kgs. Lyngby, 2006.

[Haug, 2007]

A. Haug, "Representation of Industrial Knowledge," Ph.D. afhandling, Institut for Produktion og Ledelse, Danmarks Tekniske Universitet, Kgs. Lyngby, 2005.

[Hvam, 2006, 1]

L. Hvam, "Mass customisation of process plants," International Journal of Mass Customisation, Vol. 1, Iss 4, pp. 445-462, 2006.

[Hvam, 2006, 2]

L. Hvam, "Mass customisation in the electronic industry: based on modular product and product configuration," International Journal of Mass Customisation, Vol. 1, pp 410-426, 2006.

[Hvam et al., 2007]

L. Hvam, N. H. Mortensen, J. Riis, "Produktkonfigureringskundes tilpasning af produkter," København: Nyt Teknisk Forlag, 2007.

[Hvam et al., 2010]

L. Hvam, A. Haug, N. H. Mortensen, "Assessment of Benefits from Product Configuration Systems", præsenteret ved 19. Europe Conference on Artificial Intelligence, Lisbon, Portugal, 2010.

[Hvam & Mortensen, 2007]

L. Hvam, N. H. Mortensen, "Forskningsopgaver i systemleverancer," Danmarks Tekniske Universitet, Institut for Systemer, Produktion og Ledelse, Kgs. Lyngby, 2007.

[Jørgensen, 2007]

T. R. Jørgensen, "Arkitektur & Mass Customization," Kunstakademiets Arkitektskole, CINARK, København, 2007.

[Jørgensen 2013]

S. N. Jørgensen, Developing Modular Manufacturing System Architectures, "Ph.D. afhandling, Department of Mechanical and Manufacturing Engineering, Aalborg University, Aalborg 2013.

[Karlsson, 2009]

C. Karlsson, "Researching Operations Management", New York, USA: Routledge, 2009.

[Kjærgaard, 1955]

P. Kjærgaard, "Arkitekten og byggeteknikken Indledningsforelæsning holdt på Kunstakademiets arkitektskole den 4. december 1953." Arkitekten, ugehæfte 4, 1955.

[Knudsen & Beim, 2009]

J. Knudsen, A. Beim, "Automatiseret bygningskonstruktion – hvordan man printer et hus," Kunstakademiets Arkitektskole, CINARK, København, 2009.

[Koch & Jensen, 2007]

C. Koch, J. S. Jensen, "Systemic innovation in construction: the case of a Danish state development program," Præsenteret ved 23. Annual ARCOM Conference, Belfast, Skotland, 2007.

[Kristensen, 2011]

E. K. Kristensen, "Systemic barriers to a future transformation of the building industry from a buyer controlled to a seller driven industry." Ph.D. afhandling, Robert Gordon University, Aberdeen, Skotland, 2011]

[Kvist, 2010]

M. Kvist, "Product Family Assessment," Ph.D. afhandling, Institut for Produktion og Ledelse, Danmarks Tekniske Universitet, Kgs. Lyngby, 2010.

[Le Corbusier, 1958]

Le Corbusier, "The Modulor A Harmonious, Measure to the Human Scale Universally applicable to Architecture and Mechanics," Basel, Schweiz: Birkhäuser GmbH, 2000, Faber and Faber 1958.

[Lindemann et al., 2009]

U. Lindemann, M. Maurer, T. Braun, "Structural Complexity Management An Approach for the Field of Product Design," Berlin, Tyskland: Springer-Verlag, 2009.

[Lund et al., 2005]

L. D. Lund, L. Eriksen, J. V. Nielsen, "Industrialiseret Arkitektur Økonomi – proces – produkt/værk," Kunstakademiets Arkitektskole, CINARK, København, 2005.

[Lund & Nielsen, 2006]

L. D. Lund, J. V. Nielsen, "CINARK sætter fokus: BRUGERINDDRAGELSE," Kunstakademiets Arkitektskole, CINARK, København, 2006.

[Meyer & Lehnerd, 1997]

M. H. Meyer, A. P. Lehnerd, "The Power of Product Platforms," New York, USA: The Free Press, 1997.

[Mikkelsen et al., 2005]

H. Mikkelsen, A. Beim, L. Hvam, M. Tølle, "Systemleverancer i byggeriet – en udredning til arbejdsbrug," Danmarks Tekniske Universitet, Institut for Produktion og Ledelse, Kgs. Lyngby, 2005.

[Miller, 2001]

T. D. Miller, "Modular Engineering – An approach to structuring business with coherent modular architectures of artifacts, activities, and knowledge," Ph.D. afhandling, Department of Mechanical Engineering, Danmarks Tekniske Universitet, Kgs. Lyngby, 2001]

[Mingers & Gill, 1997]

J. Mingers, A. Gill, "Multi Methodology," Chichester, England: John Wiley & Sons, 1997, pp. 187.

[Moduludvalget, 1960]

Moduludvalget, "byggeriets modulkoordinering i norden," København: Nordisk Komité for Bygningsbestemmelser, 1960.

[Moser et al., 2006]

K. Moser, M. Müller, F. T. Piller, "miadidas: the mass customisation programme of Adidas," International Journal of Mass Customisation, Vol. 1, pp. 468-480, 2006.

[Nielsen, 2010]

O. F. Nielsen, "Continuous Platform Development – Synchronizing Platform and Product Development," Ph.D. afhandling, Management Engineering, Danmarks Tekniske Universitet, Kgs. Lyngby, 2010.

[Nordwall & Olofsson, 2011]

U. Nordwall, T. Olofsson, "A Quantitative Approach for Valuation Architectural Qualities," The Open Construction and Building Technology Journal, Vol. 5, pp. 105-112, 2011.

[O'Brien, 1998]

R. O'Brien, "An Overview of the Methodological Approach of Action Research," 1998, fra: <http://www.web.ca/robrien/papers/arfinal.html>.

[Partouche et al., 2008]

R. Partouche, R. Sacks, S. Bertelsen, "Craft construction, mass construction, lean construction: Lessons from the Empire State Building], præsenteret ved 16<sup>th</sup> Annual conference of the international group for Lean Construction, Manchester, England, 2008.

[Pedersen, 2010]

R. Pedersen, "Product Platform Modelling," Ph.D. afhandling, Management Engineering, Danmarks Tekniske Universitet, Kgs. Lyngby, 2010.

[Pine, 1993]

B. J. Pine, "Mass Customization The New Frontier in Business Competition," Boston, USA: Harvard Business School Press, 1993.

[Pine et al., 1993]

B. J. Pine II, B. Victor, A. C. Boynton, "Making Mass Customization Work," Harvard Business Review, Vol. 71, Iss 5, pp. 108, 1993.



[Politikens retskrivnings- og betydningsordbog, 2013]

"Politikens retskrivnings- og betydningsordbog," Politikens forlag, JP/ Politikens hus A/S, København K, 2013.

[Rafiei & Rabbanin, 2011]

H. Rafiei, M. Rabbanin, "Order partitioning and Order Penetration Point location in hybrid Make-To-Stock/ Make-To-Order production context," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 61, Iss. 3, pp. 550-560, 2011.

[Russel & Taylor, 2009]

R. S. Russel, B. W. Taylor, "Operation Management: Along the Supply Chain," New York, USA: Wiley & Sons, 2009.

[Salvador et al., 2009]

F. Salvador, P. M. D. Holan, M. Pablo, F. Piller, "Cracking the Code of Mass Customization," *MIT Sloan Management Review*, Vol. 50, Iss. 3, pp. 71, 2009.

[SBI, 2008]

SBI Guidelines 216, "SBI anvisning 216", København, SBI Aalborg University, 2008.

[Sievänen, 2006]

M. Sievänen, "Mass customizing footwear: the left foot company case," *International Journal of Mass Customisation*, Vol. 1, pp. 480-491, 2006.

[Sigbrand & Jensen, 2008]

L. Sigbrand, H. P. Jensen, "Tilgængelige boliger", København: Statens Byggeforskningsinstitut, 2008.

[Silverman, 2001]

D. Silverman, "Interpreting Qualitative Data," 2nd edition, London, England: SAGE Publications Ltd, 2001.

[Thuesen & Jonsson, 2009]

C. Thuesen, C. C. Jonsson, "The Long Tail and Innovation of New Construction Practices – Learning Points from Two Case Studies," i *Open Building Manufacturing Key Technologies, Applications, and Industrial Cases*. EU: ManuBuild, pp. 49-64, 2009.

[Ulrich, 1995]

K. Ulrich, "The role of product architecture in the manufacturing firm", *Research Policy*, Vol. 24, pp 419-440, 1995]

[Ulrich & Tung, 1991]

K. Ulrich, K. Tung, "Fundamentals of product modularity," *Design Manufacture/Intergration*, Vol. 39, pp. 73-79, 1991.

[Verschuren & Doorewaard, 2010]

P. Verschuren, H. Doorewaard, "Designing a Research Project," 2nd edition, Hague, Nederlandene: Eleven International Publishing, 2010.

## Appendiks 1

# Modules in historic building construction according to the Copenhagen Building Code

Artiklens forfattere er: Anders Kudsk, Christian Thuesen, Lars Hvam, Niels Henrik Mortensen.

Artiklen er fremlagt på 2011 World Conference on Mass Customization, Personalization, and Co-Creation: Bridging Mass Customization & Open Innovation. Den 16. til 19. november 2011, San Francisco Airport Marriott Waterfront

## Modules in historic building construction according to the Copenhagen Building Code

### Abstract

This paper describes an analysis of building works from Copenhagen, Denmark in the period 1850 to 1950. In the study we investigate, based on the theory of product architecture and product modularization, if examples of the use of well-defined interfaces can be found. Furthermore, the aim is to study how the use of such interfaces has influenced former building processes and how they were implemented and kept stable over decades. The result of the study is that at that time a number of standardized interfaces between the individual parts of the building work existed, and that these interfaces have remained unchanged for many years. The interfaces have been identified and modeled seen from a product, process and organizational perspective. The standardized interfaces have been implemented and kept primarily because of the existing legislation, training of project supervisors and craftsmen, and arrangements / agreements between the individual professional groups.

### 1. Introduction

In this paper, we analyse historic building construction in Denmark using methods for the definition of modules and their interfaces. The aim is to investigate whether in historic building, it is possible to find examples of the use of what we would today describe as modules – methods and qualities that have been lost to construction today, methods and qualities that it could be beneficial to revive.

Building construction in Denmark throughout the last 200 years has gone through several levels of development. These levels cannot be separated completely but can generally be divided into three phases. (Gottlieb 2010)

- from the sporadically regulated, but tradition- and trade-bound (Building customs and practices)
- to the modern building construction that is especially known from the 1960s and 1970s (Rationalisation).
- to the post-modern building construction that we know today (Negotiation).

In this paper we look at a sub period from about 1850 to 1900.

The development through the three phases has been made possible due to the technological and societal development and has mainly be driven by the aim of higher quality and productivity. Especially the concept of quality has developed and changed considerably along the way, however, particularly from modern to post-modern construction. In the earlier phases, the concept of quality was mainly concerned with fire, hygiene and statics. These factors have reached such a level in modern and post-modern construction that the concept of quality today is to a much greater extent directed toward architectonic qualities, such as individuality in the form of fulfillment of specific needs and unique expression.

In spite of this development, building construction has been criticized from many sides for not having had sufficient increases in productivity and quality. Since the transition to the post-modern, building has not achieved the same improvement in productivity as

other branches producing physical products (Thomasen 2004). The solution to this lack of improvement in productivity is seen by many today to be system deliveries based on Mass Customization, and the use of modules with well defined and standardized interfaces (Thuesen 2009).

Development throughout this whole period was driven by thinking with an 'away-from' rather than 'toward' mind set. This is reflected for example in the building code's prohibition against flammable building constructions such as timber framing (Engelmark 1983), and state certification of untraditional building construction requiring that trained masons' working hours must not exceed 15 percent of the total number of working hours (Kjeldsen 1954). In many areas, this 'away-from' approach meant that traditional qualities were forgotten, regardless of whether they might have continued to be of value. One example is lines of balance, a planning method in which activities are combined with resources and location. This method was a great success when used for modern building construction, but it was almost never used after the transition to post-modern construction, probably because it was linked with standard building's many repeating factors or cycles. But also post-modern construction can be very repetitive, and the method is now many years later being used again (Partouche, Sacks, and Bertelsen 2008), (Kenley 2004).

The hypothesis for this article is that traditional construction had some qualities that made it possible to construct individual buildings in a way that was quite standardized. These qualities are known to us today from theories of mass customization, product architecture and the use of modules, but they were of course not described in this way in their own time. In this article, we present examples of how building customs in the past can be described using present day theory, not to create clarity about the past – we leave that to other disciplines – but to show how present day building methods can be improved.

The structure of building processes has also changed with time, from being strictly divided between artisan trades to today when they are much more complex and include architects and several engineering disciplines. The divisions of labor -now also mean that the architects and engineers who design buildings do not have the same knowledge as they did earlier about how the buildings will be constructed. There is also now a much greater variation in building construction, which can be seen for example in the traditional buildings of the 1800s, which had a repetition degree of about 50, whereas today it is 2.5. Repetition degree is defined as the number of times a given building element is used in the construction divided by the number of variants of the given building element (Hanni and Nedelkovski 2004). The reduced amount of repetition has the natural consequence that the profitable share of the preparatory work is less, and that the same routine cannot be developed, which again affects productivity. The lower amount of repetition also means that today there is a significantly higher risk that errors will occur during the building process, caused for example by lack of communication between the project's actors, or as a result of lack of routine in implementing the specific and often unique solution.

The use of product architecture with well-defined modules has in some cases proved to contribute to significant increases in industrial enterprises' productivity, since implementation of product architecture with well-defined interfaces maintained over many years, makes it possible to develop production processes that are more effective – for one reason, because the well-defined interfaces make it considerably simpler to coordinate the individual sub-processes that are typically carried out by different groups of artisans.

## 2. Problem formulation

In relation to building construction, we investigate whether elements have been used in construction in the past, which we know today from product architecture theory, and whether examples can be found of the use of modules with well-defined interfaces. In addition, the aim is to investigate how the use of such interfaces has influenced earlier times' construction processes and productivity. This article describes a project in which we have analysed buildings from the period 1850 to 1900 in order to clarify the following questions:

- Is it possible to identify examples of the use of modules with stable interfaces in historic building?
- Can such interfaces as were used earlier be described via modern methods for description of modules and their interfaces?
- Can module solutions be identified in historic building within product, process and organization?

And if so, what effect can these have had and how can experiences with them be transferred to modern building construction?

## 3. Theory and method

The investigation is based on theory from Mass Customization, system deliveries and product architecture, with special focus on definition of modules and modules' interfaces, including Product Variant Master and Modular Function Deployment. These two tools are used in this work to formulate a hypothesis regarding the modules found in apartment buildings built from 1850 to 1900.

### 3.1 Mass Customization

Mass Customization has its roots in the manufacturing industry, where enterprises either went from mass production of standard products or from single-piece production to production of customized products. By structuring the product as a series of modules with fixed interfaces, customization can be accomplished by combining a series of modules with the desired properties (Pine 1993), (Ulrich 1991). Thus, production of the individual modules can be standardized without the finished product becoming a standard product with only one design.

The immediate benefit of this form of production is the possibility to achieve economy of scale, which lowers costs even with a large variety of products, structured product selection, and increased customer focus and ability to cover fragmented markets. In brief, mass customization is mass production of individually adapted products and services, based on predetermined modules and processes (Hvam, 2010).

### 3.2 Product architecture

Many different definitions of product architecture exist in the literature. Sanchez (2000) argues that product architecture is created when a new product design has been decomposed into its functional components, and interface descriptions have been fully specified. The types of interfaces range from attachment, transfer, control and communication, and spatial interfaces to environmental interfaces. (Meyer and Lehnerd, 1997) describe product architecture as a combination of sub-systems and interfaces. He argues that every product has an architecture, and that the goal is to make that architecture common across many variants. (Ulrich, 1995) understanding is that product architecture is the scheme used to map the product's functions in relation to the physical components, thus defining product architecture as the arrangement of functional elements, the mapping from functional elements to physical components, and the specification of the interfaces between them. Harlou (2006) describes product architecture as a structural description of a product assortment, product family or a product. It consists of design units, standard designs, and interfaces, where design units are characterized by being unique to each product, and standard designs characterized by being reused between one or several product families. In this definition, clear emphasis is on the decision to reuse, on adequate documentation and organizational ownership.

### 3.3 PVM

A Product Variant Master (PVM) contains in its basic form three viewpoints: customer, engineering, and part views (Harlou 2006). In the customer view, the focus is on the functionality that is relevant for the customer, whereas the engineering view is built up around the technical solutions that are to be used to fulfil the customer's wishes. In the part view, the product's parts are structured according to its physical structure. The part view resembles a part list structure, where everything the product contains is listed.

When making the module, it is important that a clear connection exists between the three views. For example, the customer-relevant functionalities should be presented in the proposed technical solutions and in the parts that compose the final product.

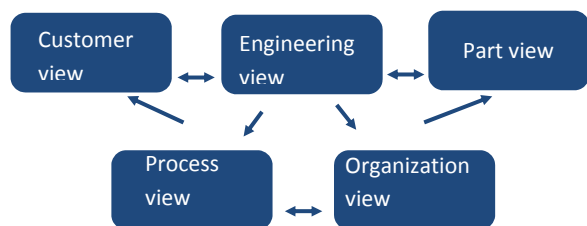


Fig. 1: The relations between the views

The PVM is here expanded with the process view and organization view. The process view describes which tasks are carried out in connection with the product, and the organization view has to do with which organizational unit is to carry out the task.

### 3.4 Modular Function Deployment

Modular Function Deployment (MFD) is a structured method to objectively find the most optimal module-product-design (Ericsson and Erixon 1999). The method consists of five steps, which all work toward a profitable module design. The five steps are shown in fig 2



Fig. 2. The five step in MFD

In the following we will analyse the modularity of the Copenhagen Building Code and building tradition based on the PVM and MFD method. We will however omit step 5 "Improve each module", since the aim of this investigation is to show that historic building can be described as consisting of modules and not to improve modules.

### 3.5 The Copenhagen Building Code and building tradition

The Copenhagen Building Code was adopted in 1856 and was introduced during the intense expansion that occurred after the inner defences around Copenhagen were abolished – "when the ramparts fell". The code defined the lowest construction standard allowed and thereby buildings' quality level. The code contained detailed demands for the buildings' construction and materials, for example wall thicknesses and lumber dimensions. The traditional building custom of dividing artisans according to the materials used, such as wood and tile, functioned in combination with the code. Together, they set a clearly defined framework for this type of building for

about 100 years (Engelmark 1983). The main design was made by an architect, with some few drawings showing the plan view, sectional view and elevations. The design was made on the basis of exact knowledge about the building methods to be used, and this material could be given directly to artisans in the relevant building trade who, with a limited amount of detailed planning, were able to carry out the work with methods that were learned in advance and used in all building construction.

Here, using the MFD method, we divide historic building into modules, and then place them in a PVM to show the examples interfaces.

#### 4.1 MFD step 1

##### – Define customer requirements

In relation to apartment buildings from 1850 to 1900, customer demands did not vary much. The customer focused mainly on three factors: square metre price (optimal exploitation of the lot), quality, and apartment size. There were however legal requirements in accordance with the building code that had to be met in connection with building an apartment building. Since this part of the analysis primarily focuses on the customer, only the code requirements that are in the customer's interest are discussed here.

Customer demands, code requirements and building properties in a MFD matrix:

Product Attributes	Weight	Trend	Modulization	Area	Stairways	Storey height	Materials	Degree of insulation	Number of rooms	Fuel access	Ventilation capability	Light inflow	Stability	Installations	Accessibility	Appearance	Total
Low price	5		9				9	3									21
Quality	4		1				9	3					3	3		9	27
Size	3			3		3			3								9
Code requirements																	
Good water drainage	1						1							3			4
Good fire prevention	4				9		3	9			1						22
Good access to light	4											9					9
Good access to water	4													9			9
High building stability/security	3						3						9				12
Good spatiality	3			9		9			3								21
Possibility to regulate heat	3							1		3	9			3			16
Total (weight x relation)			49	36	36	36	103	66	18	9	31	36	39	60	0	36	

Table 1 MFD matrix

## Analysis

The requirements are here prioritized on a scale of 1, 3 and 9 and weighted in relation to each other on a scale from 1 to 5, where 5 is the highest with respect to relevance for the customer. For example, *low price* is clearly 5, since the customer will always prefer paying as little as possible. *Trend* is then evaluated in relation to the requirements in question, i.e. whether the trend is rising, stable or falling indicated respectively by green, yellow or red. For example, all the customer's demands have a rising trend, since focus on the customer and the customer's consciousness about own demands have intensified since that time.

## 4.2 MFD step 2

### – Select technical solutions

Here, the product's main function is housing, which leads to a series of sub-functions that must all be implemented with the technical solutions used.

After the first step, the technical solutions are presented. This is done by drawing a function-means tree. The technical solutions are found with the help of such a diagram, which is used to visualize the product's functional structure and the technical solutions related to it (Ericsson, et al., 1999). A complete diagram provides an overview of all the technical solutions the product contains; then, it is possible to create modules using the *Module Indication Matrix* method

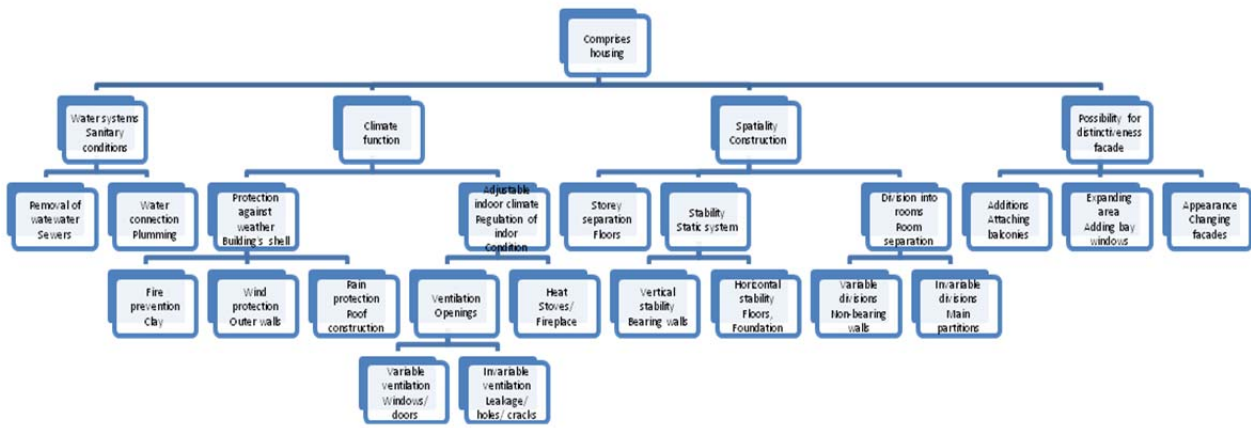


Fig. 3 Funktion-means tree

## 4.3 MFD step 3

### – Generate concepts

The MIM matrix is used to define the modules. Twelve different module drivers are used here to find the connections between the technical solutions. The expectation is that areas such as working methods, materials and organization are obvious areas within which to define modules. The basis for this assumption is that the function-means diagram shows that apartment buildings at that time had a very simple structure; the literature study also shows that the tasks were divided between the artisan trades within which the working methods were learned and practiced until they became routine.

Module drivers		Technical solutions	Water installation	Sewage	Additions	Foundation	Outer walls	Roof construction	Windows/doors with hinges	Holes/cracks/leaks	Heat stoves/Fireplaces	Main partition walls	Non-bearing walls	Floor/ceiling	Bearing walls	Facade	Addition of balcony	Addition of bay window	Facade change	Total
Development and design	Carryover		3	9		9	9	3	9			9	9		9	1	3	3		76
	Technological evolution		3	3	3			1						3						13
	Planned design changes																			0
Variants	Different specification							1								1				2
	Styling															9			1	10
Production	Common unit		9	9	9	9	9	9	9			9	9	9	9	3	9	9		120
	Process/organization		9	9	9	9	9	9	9			9	9	9	9	3	9	9	9	129
Quality	Separate testability		1	1																2
Purchase	Supplier availability																			0
After sale	Service/Maintenance																			0
	Upgrading																3	3	3	9
	Reuse																			0
Total			25	31	21	27	27	23	27	0	0	27	27	21	27	17	24	24	13	

Table2: MIM matri

The three dominant module drivers are shown, as expected, to be carryover, common unit, and process/organization.

*Carryover* means that some parts can be transferred without changes from one building to another and are stable over time. In this case, a high number on the scale means that the same materials are used several times and from one building to another. *Common unit* is defined as the same working method – for example, when win-

dows are made and installed the same way every time. Like carryover, a high number indicates that the working method does not change between building projects. *Process/organization* means that it is the same artisan group that carries out the task, and a high number indicates that the same artisan group always carries out the same processes. Using the MIM matrix, the following eight modules are defined:

Module	Most important driver	Technical solutions
Installation	Process/organization	Water installation Sewage
Storey separation	Process/organization	Additions Floor/ Ceiling
Bearing walls	Process/organization	Outer walls Main dividing wall
Non-bearing walls	Process/organization	Non-bearing walls
Facade	Process/ organization Upgrading	Facade, Addition of balcony Addition of bay window Facade change
Windows and doors	Carryover Common unit Process/organization	Windows and doors
Roof construction	Common unit Process/organization	Roof construction
Foundation	Common unit Process/organization	Foundation

Table 3: Modules

#### 4.4 MFD Step 4

–Evaluate concepts

To analyse conditions between modules, five types of interfaces relevant for apartment buildings are defined:

	Installation	Storey separation	Bearing Walls	Non-bearing walls	Facade	Windows and doors	Roof construction	Foundation
Installation	S							
Storey separation	B,O	S						
Bearing walls		F,O	S					
Non-bearing walls		F,O	F,O	S				
Facade	A,O		A		S			
Windows and doors			B,O	B,O	B,O			
Roof construction	A,O	F,O	F,O		F	B,O		
Foundation			F	F,O	P			

Table 5: The identified interfaces between modules

#### 4.5 PVM

On the basis of the modules described, a PVM is made for historic building. In addition to the usual three views, customer, engineering and part views, the PVM also contains two extra views – process and organization. Here, only an excerpt is shown of part and process views, based on the fact that the process of organization and viewer are so closely related. The last view, the organization view includes the artisan groups that participated in the building process. Specifications for this view could be descriptions of competences belonging to each group; they could also be general at that time.

Interface	Notation
Same	S
Surface	F
Break	B
Addition	A
Organization	O

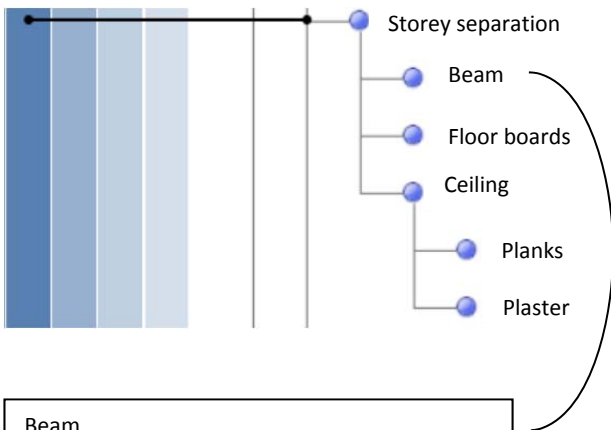
Table 4: Interfaces

Interface *same* shows that the module has an interface with itself when it is repeated –

for example, when the bearing wall modules are stacked up for every storey and thereby have interfaces with each other. *Surface* means that two modules' surfaces meet each other. An example of this could be a bearing wall and the foundation, since a surface of the wall rests on the foundation. *Break* means that one module breaks through another – for example a bearing wall broken by windows and doors. The facade is set up outside the bearing wall, and the interface between these two modules is therefore *addition*. Finally, the interface *organization* indicates the different trades' modules meeting via their processes, i.e. when the carpenter can start his work with the roof construction immediately after the mason has finished the bearing wall. Figure 4 shows the identified interfaces between modules, using as an example the module of the *bearing wall*

**4.5.1 Part view** In the part view, the components' specifications and interrelationships are in focus. Rules and drawings here are about each part's properties, such as dimensions.





#### 4.5.2 Process and organization view

To map the process, a module is presented that shows how the process and flow of information progresses throughout the project. The mapping shows that the process can be divided into modules (activities), and that this division follows that of the other views. For the interfaces that go across the artisan groups, fixed routines exist for the exchange of information. For example, the mason gives a clear message to the carpenter when a storey is finished and the storey decking can be laid. Fig 5 shows a section of a module showing this interface.

**Beam**

Building code §14 the beams must have a cross sectional area of at least 6 square inches when the distance between the supporters is not more than 5 feet. For each foot this distance increases, the beams must increase with 1/3inch on each side.

Fig: 4 Part view

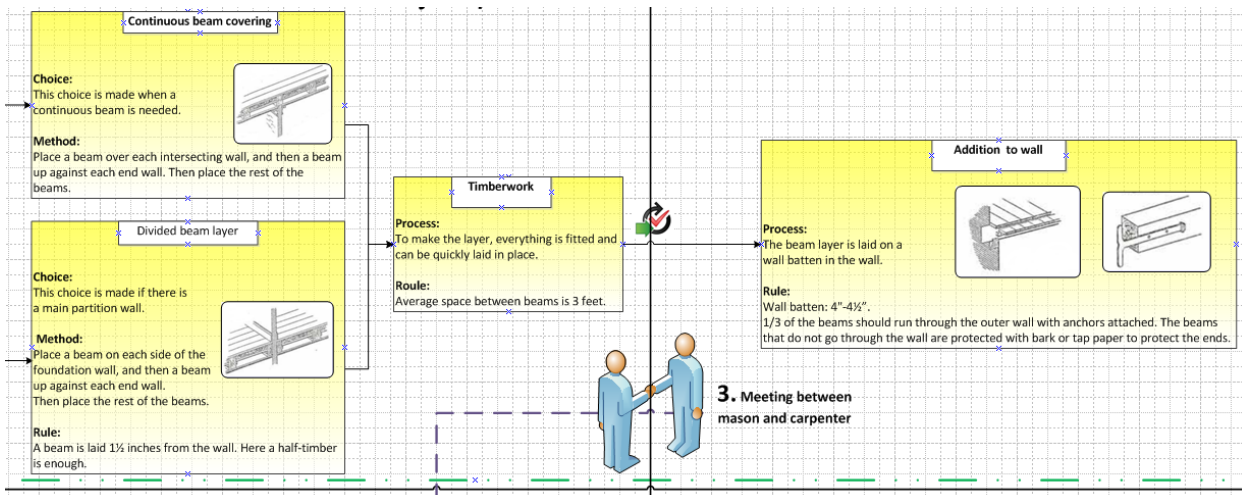


Fig: 5 Interface between mason and carpenter

### 5. Example of an interface

Installing a window in a bearing wall is a good example of the advantages of a fixed interface. The mason and the carpenter have clear roles and rules for how and when their tasks are to be carried out, including standards for the wall's different thicknesses, how the variation in the wall's thickness should be handled, and the placement of the window frame. This makes possible both a standardized process for installing the window in the bearing wall, and a clearly defined exchange of information between mason and carpenter.

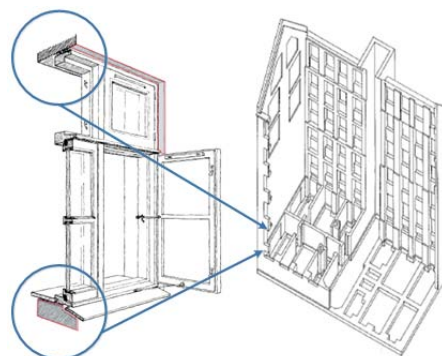


Fig: 6 Interface between wall and window

If these standards had not been accepted as valid, each building and each constellation of masons and carpenters would have had to

develop a method that would probably vary from job to job and would result in a varying process and information exchange.

## 6. Implementation

The modules were very well implemented among architects and artisans in the past, so well implemented in fact that together with the building code, they could be called a culture; i.e. a way things were done without being questioned. This has of course, together with the fact that the code maintained the methods, been valid for a long period of time extending beyond the period we are investigating here. But they were also imbedded in each artisan group, so apprentices learned them from their first day at work. Also, architects were knowledgeable about the artisans' work, which meant that they learned about the whole building process. Last but not least, the methods were good and many years passed before any new methods could compete with them. In this way was the modularity supported by an organizational modularity.

## 7. Discussion: Was building according to the Copenhagen building code varied?

Whether the buildings being constructed according to the Copenhagen building code were customized or standardized is a matter of definition. Seen in relation to current post-modern buildings, they could well be called standard construction; but seen in relation to customer demands in the past, there were good possibilities to deliver the variation that customers asked for.

Since a low square-metre price for social housing was the most important parameter for the customer, this customer demand basically did not vary. Satisfying this demand required variance, however, which was most evident in the utilization of the lot – full utilization was important. The modules described here made it possible to give the building the desired ground plan and thus made it possible to achieve the desired variation.

The apartment's size was another area that required variation in order to satisfy the different groups of tenants. Again, the building code set some minimum requirements, but when these were fulfilled, it was possible to give the apartments the desired size. Mass customized products were aimed of course at satisfying the broadest customer wishes; they were never supposed to satisfy them all, but only those of a selected segment of the market.

Architectural expression in relation to the facade could be varied to suit the fashion of the time; i.e. the desired facade decoration could be mounted on the outside of the body of the building. Within social housing construction, it was therefore not the form of the body of the building itself that gave the building the desired architectural expression. This was the subject of a certain amount of criticism from the architectonic trend called "Europeans" (Engelmark 1983); but this criticism was directed toward building lines, which for example prevented the use of bay windows to a certain extent, and not toward the technical building solutions. In 1878, the possibilities were expanded to give dispensation in relation to building lines, however, without this changing any other principles described in this paper.

## 8. Conclusion

The analysis shows that the more than 100-year-old buildings constructed in accordance with the Copenhagen building code can be described according to current building principles as consisting of modules with fixed interfaces, both in relation to the physical form of the building parts and the materials, and in relation to process and organization. It is especially interesting that the interfaces were repeated across the different views. It was thus the masons using mainly tile who established the bearing wall building part, and the carpenters using wood who established the storey deck building part. It is also evident that the interfaces between the modules were standardized and independent of the buildings' other dimensions. It is therefore possible, with current methods, to describe historic building as consisting of modules.

It is also evident that the design was made based on knowledge of and consideration for the modules' limitations and the methods used thereafter; and that throughout the processes, a shift in responsibility could only occur once the architect delivered his material to the artisan group that was to implement the design. The modules and their interfaces were maintained for a very long period, supported by the building code and embedded in the training; together, they provided optimal conditions for implementing the solutions.

In describing historic building with our current conception that it consisted of modules, it would be obvious to ask: Did it have any of the advantages that are often claimed today as arguments for using modules? The purest way of answering this question would be to directly compare the productivity and quality of present and past buildings. But the general technological development and lack of data makes a direct comparison impossible. The studies shows however that fixed interfaces can be identified between the physical, organizational, and process modules regardless of the building's size and design. Since both technical and process failures normally occur at the interfaces, the continued use of modules must have contributed to reducing building projects' technical and economic risks.

At the same time, within the different modules, there were fixed, artisan-based methods with completely clear principles regarding how each part should be constructed, and at what point in the process the interfaces should be managed. These methods were imbedded in artisan traditions, known by the artisans, and also appropriate to the materials and tools available. Within its own narrow context, this must have given good productivity and secure implementation.

## 9. Perspectives

Compared with current building, historic building and its methods, organization and processes must be described as simple, especially in relation to loss of heat and installations. Radical developments have taken place since then, developments that have also led to a marked increase in the number of building trades.

But how can we use this knowledge that historic building can be described as consisting of modules with fixed interfaces? When answering this question, it is important to be aware that building in the past was much simpler than it is today, but part of this simplicity was also due to the fact that historic building, via its division into

modules, was so easy to interpret. And here lies part of the answer. If we can completely or partly develop and structure modern building with modules across the different dimensions, then this would contribute to make building simpler and easier to comprehend. Also, historic building shows that the use of modules with stable interfaces made it possible to develop strong artisan traditions, which resulted in buildings of high quality. Due to the many new requirements, similar modules in current building cannot be divided purely according to the traditional artisan trades. On the contrary, it is necessary to develop a new vision of organization, a vision that makes it possible to combine modules across the divisions between building trades and not least throughout all processes.

A desire also presented from a socio-technical view in "Understanding Modularity in a socio-technical perspective" (Thuesen forthcoming).

In the historic construction process, the architect made his design based on knowledge of and consideration for the subsequent processes; he therefore delivered a project that complied with the subsequent module structure. It is thus important that in current building, modules likewise permeate the whole and connect the planning phase with the implementation phase. This also coincides well with a general redefinition of the conception of modules in building, from something purely physical with fixed dimensions to something that comprises organization, process and the physical, with focus on interfaces and methods.

## References

Engelmark, J. (1983). **Koebenhavnsk etageboligbyggeri 1850-1900 En byggeteknisk undersoegelse**. SBI-Rapport 142. ISBN 87-563-0497-8 ISSN 0573-9985

Ericsson, A. and Erixon, G. (1999). **Controlling Design Variants: Modular Product Platforms**, Society of Manufacturing Engineers.

Gottlieb, S. C. (2010) The constitution of partnering A Foucauldian analysis of dispositives, space, and order in Danish construction, University of Denmark, Department of Management Engineering, ISBN 978-87-90855-71-0.

Hanni, G. and Nedelkovski, S. (2004), **Industrialisering og innovation i byggesektoren**, Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering.

Harlou, U. (2006). **Developing product families based on architectures Contribution to a theory of product families**. Department of Mechanical Engineering, Technical University of Denmark. ISBN 13 978-87-90130-07-7

Kjeldsen, M. (1954). Om utraditionelt byggeri. In: **Boligbyggeriets produktionstekniske problemer**, edited by Boligministeriets Produktivitetsfundsudvalg. Publishing 1954.

Meyer, M. H. and Lehnerd, A.P. (1997). **The Power of Product Platforms**. New York: Free Press

Partouche, R. Sacks, R. and Bertelsen, B. (2008), **Craft Construction, Mass Construction, Lean Construction: Lessons from the Empire State Building, ICLC 16, Manchester**

Pine, J (1993) **Mass Customization – The New Frontiers in Business Competition**, Harvard Business Scholl Press, Boston 1993

Russell K. (2004) **Project Micromanagement: Practical Site Planning and Management of Work Flow. 12th Annual Conference of the International Group for Lean Construction, Elsinore.**

Sanchez, R. (2000). Modular architectures, knowledge assets and organizational learning: new management processes for product creation, **International Journal of Technology Management**, Vol. 19 No. 6.

Thomasen, M. A. (2004) **The economic organization of building processes, On specialization and coordination in interfirm relations**, Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering, April 2004, ISSN 601-2917, ISBN 87-7877-158-7, Side 272

(Thuesen 2009) interfaces (Thuesen, Jensen & Gottlieb 2009).

Thuesen forthcoming

Ulrich, K. (1995). The role of product architecture in the manufacturing firm, **Research Policy**, Vol 24: 419-440.

Ulrich, K. (1991) **Fundamentals of product modularity, Issues in Design/ Manufacture Integration**, American Society of Mechanical Engineers; Design Engineering Division (Publication) DE, 39 p. 73-79, ASME, New York, NY, USA, 1991

## **Appendiks 2**

# **Expanding the field of modularization with the introduction of the module application matrix**

Artiklens forfattere er: Anders Kudsk, Daniel Georg Rudkjær Nordklint, Lars Hvam, Christian Thuesen

Artiklen er submitted til "International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice", artiklen er endnu ikke blevet reviewed.

## EXPANDING THE FIELD OF MODULARIZATION WITH THE INTRODUCTION OF THE MODULE APPLICATION MATRIX

This article presents a view on how modularization and Mass Customization can be applied in companies that produce complex and highly engineered products such as cement factories and multistorage buildings. In such cases, there is a need to work with a partial modularization of the products. However, the theory concerning modularization has not dealt very much with this issue. With the introduction of The Module Application Matrix, we discuss the limitations of the current theory and inspire an expansion of the field to also include products that can only be partially modularized or can only use modularization on a conceptual level. The Module Application Matrix is described theoretically and applied to real life examples.

**Keywords:** Modularization; Mass Customization; The Module Application Matrix, partial modularization

### 1. INTRODUCTION

The theory of Mass Customization has primarily been focused on products that are suited for complete modularization efforts. In effect this means that companies, that strive to introduce principles of modularization in their product lines, will usually attempt to remodel their products to become completely modularized with detailed descriptions of the modules even though the companies might experience greater benefits from a lesser degree of detail and/or modularization (Author, 2006-2).

In this article, a new tool will be introduced to accommodate the need for companies to be able to position their products according to the degree of modularization and the degree of detail. This positioning will help companies to better understand their current situation and in which direction to move the products.

### 2. THEORY

#### Configuration and Mass Customization

The basic idea of Mass Customization is to create value to the customer by adapting the product to the specific needs of the customer and by giving the customer the feeling of getting a tailor-made product. Seen from the producer's point of view, the products are production wise uniform and can be produced using the standardized and industrial production apparatus.

In other words, the idea of customization is to develop a product program which enables the company to offer the customer a unique product which matches the individual customer's needs. At the same time, the product program has a number of common features with respect to design, production and assembly/installation, which means that the products can be looked at as being the same and therefore easier to produce, assemble and install.

The concept of Mass Customization describes a tendency, in which companies, who have previously manufactured mass-produced and uniform products, start to manufacture their products in a continually increasing number of variants, so as better to be able to fulfill their customers' requirements (Pine, 1999; Tseng and Piller, 2003). A very important part of Mass Customization is modularization. The design and user customization of the product is done by selecting, and combining, modules containing the relevant function and performance (Author, 1999; Qin and Wei, 2010).

#### Modules and Modularization

The literature contains a number of somewhat tangible definitions of the concept of modules (Pedersen, 2010; Mortensen et. al., 2010). In this article the definitions of modules from scientific areas such as Product Platforms and Mass Customization will be applied. In these areas, the definitions are often expressed by a series of demands and wants of the modules or the modularization. In this context, the concept often covers limited physical units with a specific function (Ericsson and Erixon, 1999) also known as the one-to-one principal (Mikkola, 2006; Ulrich and Eppinger, 2008). Another parallel definition of modules is to minimize the number of interfaces and that these interfaces have to be standardized. By far the most descriptions of modules focuses on a physical partitioning of the product and not a process- or knowledge based partitioning of the product (Pedersen, 2010). For an elaboration on different perceptions of modules, the authors refer to Pedersen (2010). For the scope of this article, the focus will be on, but not limited to, a perception of modules as physical, or descriptions of physical components, applied as a reusable unit in the design or production of a product.

#### 2.1 Practical Application of Theory

The literature of modularization contains a vast number of cases in which companies have benefited greatly from the usage of modules. Usually the companies have managed to get more from less by applying modularization to help control the design and production of their products. Examples of such companies could be the car manufacturer Volkswagen, the electronics company American Power Conversion and others (Harlou, 2006; Author, 2006).

The beneficial effects of working with modularization in this type of companies can be divided into two main categories, namely intern and extern. Looking at the content of said categories, it becomes apparent that the separation is in accordance with the mantra of getting more from less.

Among the external effects is a heightened quality level in the product seeing as the suggested solutions to a great extent are based on previous experiences and thoroughly tested concepts. If the product is designed according to the principles of modularization, the modular build of the product will have an environmental aspect to it, seeing as the product will be easier to break down into its original parts and thereby make the process of recycling less resourceful (Nepal et. al., 2008; Pedersen, 2010).

The usage of modules is a critical part of the principles of Mass Customization in which customized products are produced in a manner much similar to that of mass production. This approach means that customized products can be produced at a cost similar to that of mass production given that the quantity is sufficiently high. The customization of a product can be done in many different ways but one of the most effective methods is to replace specific modules depending on customer requirements (Author et. al., 2008).

Among the internal effects of using modularization is a lowered production cost as a result of better usage of resources, a lessened workload, since many of the solutions can be reused, and a higher degree of flexibility in the design- and production phase due to the product's new modular build (Pedersen, 2010). This newfound flexibility can also be beneficial to control the increasing complexity that some companies experience in their product lines (Baldwin and Clark, 1997; Miller, 2001).

However, Baldwin and Clark (1997) think that the beneficial effects of using modularization can only be achieved if "the partition is precise, unambiguous, and complete." This assumption may very well be true in manufacturing companies in which the products can often be disintegrated into precisely described modules. Meanwhile, we believe that there are still industries in which a lesser degree of modularization can be applied with great success; an example of such an industry could be construction. This article seeks to document this assertion.

A lot of the products, dealt with in the literature concerning modularization, is characterized to a great extent by the way that they consist solely of modules. Additionally these modules are often well described which in turn means that the design of the final product can be done via a combination of modules. An alternative to the aforementioned approach, is to come up with solutions of a more conceptual nature in which only the overall principles are known; the detailing is then done at a later point in time.

In the articles, reviewed in the literature survey that forms the basis of this article, the question of whether or not the products solely compose of modules, and if these modules are described in detail, receives little if any attention. The aforementioned opinion of Baldwin and Clark (1997) is that products will not benefit from principles of modularization unless the product is composed solely of detailedly described modules. We believe that this perception has its roots in the way that, when looking at industries in which modularization is usually applied, it is often taken for granted that the product in question is composed solely of detailedly described modules or is perceived as the natural goal of product development.

Not all products will benefit from a completely modularized structure, consisting solely of well described modules: There are a number of products that are characterized by being greatly customized and/ or produced in a relatively small number which means that it is either not suitable or cost-effective to create every module needed to cover the product portfolio. An example of such a product could be cement factories (Author et. al., 2008). The authors have an assumption that tower blocks will also fall into this category of products. That it is not always suitable or cost-effective to structure the entire product of detailedly described modules does not mean that benefits cannot be achieved by using a certain percentage of modules in the product or by using modules described on a more conceptual level.

An example of modularization applied on a more conceptual level could be F.L. Smidth's (FLS) design of cement factories. The modules are created from the functional specifications of the product e.g. capacity. Another purpose of using modularization at FLS is price estimations. Hence, "the configuration system only deals with the main machines defined as basis modules. Equipment that connects the basis modules together, such as conveyor belts, blowers etc. are not included in the configuration system, as these parts are not critical for the cement factory's price or capacity." (Author et. al., 2008: pp. 258).

An example of a detailedly described module, that is included in a product primarily not consisting of modules, is NCC Construction Danmark A/S' (NCC) prefabricated installation shaft which has transformed a large number of individual components produced by 9-10 different disciplines into a single unit that in turn is inserted as a module in a product that to a very limited degree is made up of modules.

A partial modularization of the product can benefit a product characterized by having a high degree of individuality by making it more structured and easier to overview, but it can also be beneficial in relation to an implementation in which a partial or gradual modularization can be part, or even a requisite, of an implementation strategy.

On that background, our aim with this article is to introduce what we have deemed The Module Application Matrix. The purpose of the model is to create an understanding of how products, to a varying extent, can be composed of modules in combination with how said modules can vary from the detailedly described module to a more conceptual description.

### 3. The Module Application Matrix

An often overlooked part of the underlying theory of modularization is that modularization is applied to different degrees in companies and that not everything can, or should, consist solely of detailedly described modules. In some cases it would be far more beneficial to use modularization as an overall frame of structuring different aspects of a given company's products. An example of this, which will be described further at a later point in this article, could be the Danish supplier of cement factories, namely F.L. Smidth.

In an attempt to describe the differences in application of modularization on different products, The Module Application Matrix is introduced. The model classifies products from two parameters: Percentage of modules in the end product and the degree of detail of the modules contained in the end product. The model is meant to be generic in the sense that it can be applied in the description of any random product. See Figure 1.

It is important to stress that even though the model shows a product's, and consequently also often the company's, static position, the model also has a dynamic element to it. Hence, the model can serve as an inspiration to companies that want to change the degree of modularization in their own products to better suit the company's profile.

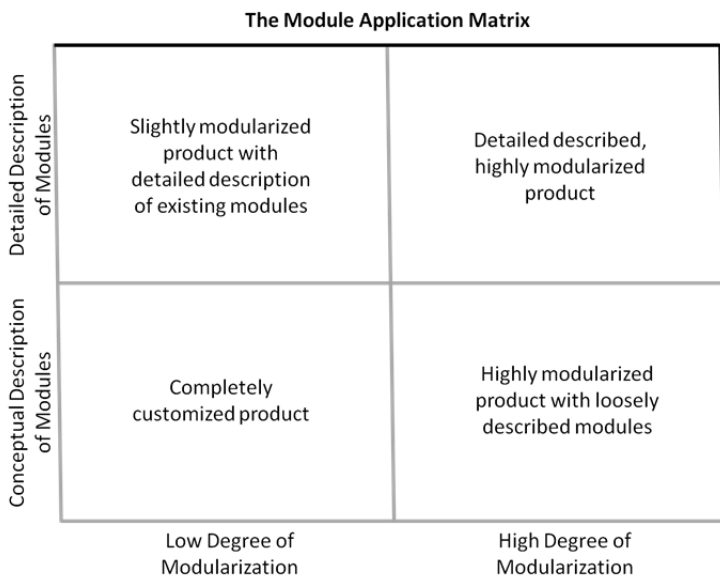


Figure 1: The Module Application Matrix

The existing theory of modularization focuses on, and takes as starting point, products that can be placed in the top right corner of the model, or wish to be brought there. As mentioned earlier, there are products that benefit from another aim; there can be some benefits associated with having more loosely defined modules. The case of FLS will be used to exemplify the application of the model. The top- and right line of the model, outlined in black, are representations of products that respectively consist of detailedly described modules and products consisting solely of modules. The theory of modularization is to a great extent occupied with cases where products can be placed at the point of intersection between these two lines.

The fact that the existing theory of modularization predominantly occupies itself with this narrow area of the model is significant to companies whose products cannot obtain a complete modularization and/or has modules that cannot be described in all detail. The current situation means that there is no way of telling whether the theory fits with products outside of this small area or if a completely, or partially, new theory has to be developed to cover this type of products. At the same time, it can be difficult for companies with this type of products to identify themselves with cases describing completely modularized products with a high degree of detail. The risk here is that some companies might decide not to work with modules at all. However, if the theory could be expanded to include this type of products, or service, it would have a great impact on a series of products that realistically cannot be brought to the top right corner of the model - and that would not benefit from it. As mentioned earlier, an example of an industry that might benefit from this could be construction.

Clarity in this field could also help companies define their goals of a possible modularization project. In turn this could help reduce the number of failed modularization projects in which a certain degree of detail and application of modules is sought implemented even though it does not fit with the product, resulting in a partial, or complete, failure.

Furthermore, it would be necessary for companies, that want to use The Module Application Matrix, to be able to describe their own products according to the two overall parameters of the model, namely the percentage of modules in the end product as well as the degree of detail in said

modules. It should be mentioned that the model presents a crude estimate of the placement of products, meaning that it would be pointless for companies to try and place their products highly accurately in the model.

### **3.1 DEGREE OF MODULARIZATION**

The first of the overall parameters of The Module Application Matrix is the percentage of modules in the product. Again, products should be placed in the model according to an estimate of the percentage of modules contained in the product in relation to the percentage of the product that is based on individual components.

To make this assessment, it is necessary to have, or make, an actual definition of what modules is. In theory this makes it possible to make an actual calculation of the distribution of components contained in modules and individual components but that is not the idea of the model which builds on an overall assessment of the percentage of modules to place the product. Hence, the precise placement of the product in the model is not interesting; but the approximate position as well as what direction a given incentive would move the product is. Also what goal can be said to be both realistic and suitable for the product is also interesting in the development process of a product.

### **3.2 DEGREE OF DETAIL**

The second overall parameter of The Module Application Matrix is the degree of detail of modules contained in the product and not the degree of detail of the product itself. Hence, a loosely defined product can easily be placed in the top part of the model if the modules contained in the product are well described. Due to the simple structure of the model, the assessment is made without the use of formulas or equations as the model makes use of crude estimates in the placement of products. If the product contains more than one module, the product is placed in the model according to an assessment of the most common degree of detail of the modules. If the product does not contain any modules at all, it will be placed in the bottom left corner of the model since the product is then characterized as being completely customized.

### **3.3 FOUR QUADRANTS OF THE MODULE APPLICATION MATRIX**

To make the placement of products in the model easier, the model is divided into four areas. In the following sections these four areas of the model are described individually.

#### **3.3.1 COMPLETELY CUSTOMIZED PRODUCT**

The bottom left area of The Module Application Matrix represents the products that would commonly be referred to as custom made. Hence, the products in this part of the model contain very few, if any, modules. In addition these modules are not described in detail. What this effect means is that products from this part of the model do not have standardized solutions, shared between products in the product portfolio, and do not carry on standardized solutions to newer versions of the product.

The modules are described on a strictly conceptual level ranging from non-described modules to norms and standards (e.g. DS, CEN and ISO) and onwards to principal solutions.

Examples of companies that have previously found themselves in this situation could be Black & Decker and American Power Conversion.

#### **3.3.2 HIGHLY MODULARIZED PRODUCT WITH LOOSELY DESCRIBED MODULES**

The bottom right area of The Module Application Matrix contains the products that has a larger number of modules which are only described on a conceptual level. This means that the products, belonging to this part of the model, have standard solutions in the sense that they have modules, but not with a high degree of detail.

An example of a company that has experienced great success from operating in this part of the model could be FLS.

#### **3.3.3 SLIGHTLY MODULARIZED PRODUCT WITH DETAILED DESCRIPTION OF EXISTING MODULES**

The top left area of The Module Application Matrix covers products that contain a low percentage of modules which are, however, described in detail. If a building contains just one module in the shape of a bathroom that has been described in detail, the building, as the end product, would be placed in this part of the model.

An example of a company that operates in this part of the model could be the contracting company NCC.

#### **3.3.4 DETAILED DESCRIBED AND HIGHLY MODULARIZED PRODUCT**

The top right area of The Module Application Matrix covers products that contain a high percentage of modules which are described in detail. The theory concerning modularization is predominantly focused on this part of the model which in turn means that other parts of the model are not supported by the theory in the same way.



There are many examples from the theory of companies that have successfully introduced a complete modularization in the sense of a high percentage of modules, that are described in detail, to their product portfolios. A couple of examples could be Black & Decker and American Power Conversion.

How The Module Application Matrix is meant to be used is addressed in the following.

#### 4. INDUSTRY APPLICATION

Usually it would be desirable to move products in an upward direction to the right in the model, meaning towards a higher percentage of modules and a higher degree of detail in those modules. However, could the model also serve as an inspiration to develop the fundamental theory to uncover the other areas of the model so that the products, placed in these areas, could also benefit from the usage of modularization to a certain extend?

The model will now be applied to already known products within different industries to demonstrate its use. The products that will be subjected to this demonstration are plotted in The Module Application Matrix in Figure 2.

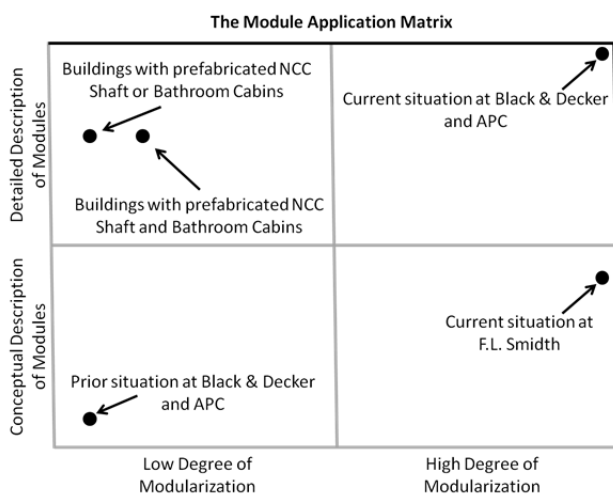


Figure 2: Examples of Products in The Module Application Matrix

#### 4.1 BLACK AND DECKER

The case is predominantly based on Meyer and Lehnerd (1997). In the beginning of the 1970'ies the consumer power tool product portfolio at Black & Decker was to a great extend characterized by its extensive range. The portfolio consisted of 18 power tool groups containing a total of 122 different models. But was it truly necessary with so many groups and different models? The interesting thing was that from the 18 groups, 8 groups represented 73 percent of the total sales and 91 percent of all units sold.

But the real problem of having such an extensive product portfolio was that the greater part of the product was being developed with focus on just one product at a time without considering how sub-components could be shared between products which could have resulted in certain economical gains.

At this point in time Black & Decker would be characterized by having very few modules, that were neither very well described seeing as focus was not on using sub-components across products. Hence, in relations to The Module Application Matrix, Black & Decker would be placed in the bottom left area of the model.

Partially because of the economical consequences of this approach, management decided to change the philosophy behind the design- and production process to prepare the company for the future. A new standard, regarding double insulation in power tools, worked as a catalyst in the change process. Management launched a new grandeur project in which the goal was clear: In the future it should be possible to redesign all consumer power tools at the same time and the same thing should be true concerning design of the production itself.

Before this could be achieved, the mindset of that time, and consequently the product portfolio, had to be abandoned. The goal was to create a common product platform that would make it possible to use selected modules across products (Meyer and Lehnerd, 1997). Dahmus et. al. (2000) refers to this type of modules as "portfolio modules".

Hence, the new product platform consisted of more subsystems, or portfolio modules: One of these modules was the electric motor (see Figure 3) which was chosen to be used across products. Black & Decker developed a universal motor for a wide range of products such as drills, sanders, saws, grinders, etc. In this development process there was a great focus on standardization and modularization.

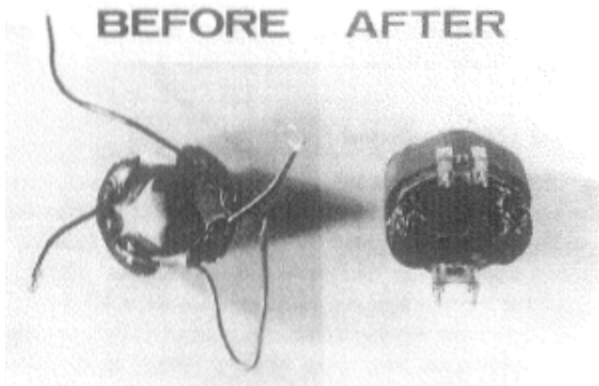


Figure 3: Black & Decker Electrical Motor ("The Power of Product Platforms")

Among other things, the new module had a fixed axial diameter which made it possible for the engineers to create a standardized housing for the motor to be used in all power tools in the product portfolio. Obviously this was but a small part of the new thinking at Black & Decker where all larger subsystems of the power tools product platform were examined to create a higher degree of standardization and modularization (Meyer and Lehnerd, 1997).

Hence, Black & Decker managed to introduce standardization and modularization to a large degree in their product portfolio via an extensive reorganization of the mindset dominant in the design- and production process. In relation to The Module Application Matrix, this means that Black & Decker has successfully moved from a position in the bottom left corner with customized products to the top right corner with products predominantly consisting of modules with detailed descriptions.

American Power Conversion has gone through a similar change which is recapped in the following.

#### 4.2 AMERICAN POWER CONVERSION

American Power Conversion (APC) specializes in designing, producing and supplying large complex infrastructure systems for data centers. APC stands out from its competitors by focusing on mass customization in the company's product development and following service. APC has not always followed this approach as made apparent by Author (2006-1).

From Author (2006-1) it is apparent how APC has managed to restructure their business strategy so that the company's products have moved from the bottom left area of The Module Application Matrix to the top right area of the model. Prior to this change, the products were custom made to match customer specifications. In other words, the company based its operations on an Engineer ToOrder (ETO) process(Author,2006-1). Development of the product portfolio has changed so that the products are now based on modules, with a detailed description, that are combined to create the final product according to a Configure ToOrder (CTO) process.

A company that has attempted to move its product portfolio to the top right corner, and failed, but now is having great success with a product portfolio placed in the bottom right area of the model, is FLS.

#### 4.3 F.L. SMIDTH

With its headquarter located in Denmark, FLS supplies the rest of the world with cement factories. The reason why FLS is been used as a case in this article is that FLS is an excellent example of a company that has benefited greatly from applying modularization methods and configuration systems to make their products simpler (Author et. al., 2008). However, the products do not consist solely of modules, and further more the modules are described on a conceptual level, which makes this case especially interesting for the purpose of this article.

To understand how the business process has changed at FLS through the use of modularization methods and configuration systems, it is necessary to understand what types of offers the company deals with. At FLS there are two types of offers; a budget offer and a detailed offer.

The budget offer is a rough estimate in which the main features of the factory is described. The description includes, among other things, a general description of the cement factory with appertaining description of operational factors such as capacity or emissions, larger machinery, a price calculation and a timetable. A budget offer takes about 1-4 weeks to make, with a resource consumption of about 5 man-weeks (Author et. al., 2008).

A detailed offer is far more demanding seeing as this includes a complete, detailed description of all the departments of the cement factory with specifications of all buildings, machinery etc. Included is also a detailed plan for the construction on site of the cement factory along with factors related to the factory's initial commissioning and operation. The detailed offer takes about 3-6 months to make with a resource consumption of about 1-3 man-years (Author et. al., 2008).

With a configuration system, it would be possible to replace a part of the detailed offers with less resource-demanding budget offers. For this to be possible, the end product had to be based on modules. The solution was that the cement factories would be constructed using basis modules, meaning main machinery. Equipment that connects the basis modules together is not included in the configuration system seeing as this equipment is not critical to the production capacity of the final cement factory. Hence, the individual basis modules are made in different sizes corresponding to the capacity of the cement factory (Author et. al., 2008). Hence, the description of the modules are conceptual rather than highly detailed.

With the use of a configuration system, FLS positions itself in the bottom right area of The Module Application Matrix which makes this case especially interesting for companies in the construction industry that wants to introduce a certain level of modularization into their products.

Before FLS decided to develop their modules in a way that would place them in the bottom right area of The Module Application Matrix they had been working on achieving a complete modularization in the traditional sense. However, the attempt failed. Most likely the failure was caused by the fact that their product was too big in comparison to the low production quantity, had too big a variance and because, in a number of areas, there were systemic links between what should have been individual modules with simple interfaces. However, these causes have not been fully researched and the preceding part of the development at FLS has not previously been described in scientific articles. The information here described originate from interviews with a person who took part in the development at FLS.

We cannot assert, based on the case of FLS, that it is not theoretically possible to bring their product to the top right corner of the model, but the case shows that it was not possible in practice to do so. A number of assumptions has emerged regarding why this is but the precise causes have not been determined which in turn shows that there is a need for additional research in relation to this type of products. However, the case also shows that there could be benefits to gain from applying modularization in other ways than that which belong to the top right corner of The Module Application Matrix.

#### **4.4 NCC SHAFT**

The case of the NCC Shaft is from the construction industry in which NCC has developed a prefabricated and configurable installation shaft, which has transformed a large number of individual components produced by 9-10 different disciplines into a single module that in turn is inserted as a prefabricated module in a number of the types of houses that NCC build (See figure 4). NCC also sell prefabricated shafts to other companies as a module to be inserted in their products ([www.ncc.dk/skakt](http://www.ncc.dk/skakt)).

Seeing as the end product only to a very limited extent consist of modules, NCC buildings containing the prefabricated shaft is placed in the top left corner of The Module Application Matrix.

In the development of the module, focus was on the internal parts of the module e.g. how the individual components could be inserted into a steel frame so that they could be transported and installed as a single unit. Considering the coordination efforts of the interfaces of the module, focus was at first on how the modules could be assembled i.e. how the modules' interfaces would fit with similar modules. It was not until later that a standardized solution was established regarding the external interfaces which, among other things, dealt with fire technical issues when the shaft shared an interface with the prefabricated bathroom cabins. This was the case even though this particular interface occurs in a large percentage of NCC buildings. Even with the aforementioned placement in The Module Application Matrix, and even though focus to a certain extent has been on the internal interfaces, the application of modules of this sort present a number of advantages. The advantages are less work on the construction site and less coordination between different disciplines, better quality achieved through separate tests and a faster assembly which makes it possible for the permanent installations to be used to supply the rest of the construction process with, among other things, water, electricity and heat.

Assembling the many part components into one physical module has meant that NCC has had to change its traditional mindset. The traditional view has been that the company produces individual buildings based on project specific planning e.g. Lean Construction (Koskela, 2000). However, with the shaft modules, non-value adding variance has been removed from the design of the building. The application of the shaft module also means that the task of constructing a building is being met with a higher degree of readiness in the sense that part of the building is readymade before it is needed on the construction site. This readiness is reflected in predetermined processes, cooperation with regular suppliers and a heightened degree of standardized production foundations than is normally present in the construction industry.

The case is based on interviews with people involved in the development and the following operation at NCC, including our own participation in this work.



Figure 4: Installation of the NCC Shaft

## 5. DISCUSSION & CONCLUSION

This article shows that the concept of modularization can be perceived much wider than is often the case in literature concerning the subject. This is true even when sticking to a perception of modules that focuses on physical modules and not for instance on more abstract perceptions such as Socio Technical Modularity (Thuesen, 2011).

Despite this, we have not, in relation to the literature study for this article, found any explicit descriptions of partial modularization, neither in relation to the degree of detail or the percentage of modules contained in the product.

With The Module Application Matrix, it is possible to describe and understand a much wider perception of modules than the full modularization which is traditionally the focus. This wider perception can be used to implement modules in products that may not benefit from a complete modularization in which the product is composed completely of fully described modules. Examples of such products could be storage buildings or large processing facilities such as cement factories which are often characterized by being very large and/or consisting of a large amount of components that work together in a systemic way. Based on the FLS and NCC cases, it is apparent that within this type of products there are benefits by only having some degree of modules rather than composing their products solely of modules.

When modules are to be implemented in products with a high level of complexity in relation to the production quantity, in many cases it will be a condition that this implementation happens gradually. The Module Application Matrix could be applied in this process seeing as it presents the opportunity to both describe the starting point of the product as well as the goal of given modularization efforts.

## 6. PERSPECTIVATION

Within the area described by The Module Application Matrix, a number of questions arise that the present theory of modularization does not immediately offer answers to. How is a module described in a product that does not solely consist of modules? Normally, focus is on the interfaces between modules, but how is an interface between a module and something that is not standardized, or described as a module itself, described? Should one instead focus on the internal parts of the module e.g. interfaces between internal sub modules?

By only to a limited extent standardizing the module's external interfaces these would have to be coordinated in relation to the application. Hence, a process arises which could be described as a "Configure To Engineer to Order" (CTETO) process. Such a process could describe how some modules have to be designed in detail and/or that parts of the product does not contain modules, meaning that they would have to be designed from scratch. An obvious question is whether or not there would be anything to gain by following such a process. The answer depends on the type of product and what other options are available. Compared with a pure Configure To Order (CTO) process, the benefits is expected to be less by following the CTETO process. However, compared to the Engineer To Order (ETO) process, there are a number of benefits to gain. By putting part of the product's components into modules, there would be fewer units needing coordination in relation to the design. Therein lays a benefit which the NCC case demonstrates. At the same time there is a possibility that the standardization, that lie within the usage of modules, could mean that certain benefits from classical standardization could be achieved to certain extent. The development of concepts for partial modularization could

help companies that produce complex and highly engineered products such as cement factories and multistorage buildings to achieve the benefits of mass customization and modularization.

## 6. References

1. Baldwin, C. Y. and Clark, K. B. (1997). Managing in an age of modularity. *Harvard Business Review*, September-October: 84-93.
2. Dahmus, J. B.; Gonzalez-Zugasti, J. P.; Otto, K. N. (2000). *Modular Product Architecture*. ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Baltimore, Maryland.
3. Ericsson, A., Erixon, G. (1999) *Controlling Design Varians Modular, Modular Product Platforms*. Society of Manufacturing Engineers Dearborn, Michigan. ISBN: 0-87263-514-7.
4. Harlou, Ulf (2006). *Developing product families based on architectures: contribution to a theory of product families*, Doctor Thesis, Department of Mechanical Engineering, Technical University of Denmark.
5. Author (2006-1).
6. Author (2006-2).
7. Author (1999).
8. Author et. al. (2006)
9. Author et. al. (2008).
10. Koskela, L. (2000). *An exploration towards a production theory and its application to construction:An exploration towards a production theory and its application to construction*. ISBN 951-38-5565-1.
11. Meyer, M. H. and Lehnerd, A. P. (1997). *The Power of Product Platforms: Building Value and Cost Leadership*. The Free Press, New York. ISBN 978-3-4516-5530-8.
12. Miller, T. D. (2001). *Modular Engineering: An approach to structuring business with coherent modular architectures of artifacts, activities, and knowledge*, PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, Technical University of Denmark.
13. Mikkola, J. H. (2006). *Capturing the Degree of Modularity Embedded in Product Architectures*. *The Journal of Product Innovation Management*, 23:128-146.
14. Author et. al. (2010).
15. Nepal, Bimal; Monplaisir, Leslie; Singh, Nanua; Yaprak, Attila (2008). *Product modularization considering cost and manufacturability of modules*. *International Journal of Industrial Engineering*, 15(2): 132-142.
16. Pedersen, Rasmus (2010). *Product Platform Modelling: Contributions to the discipline of visual product platform modelling*, PhD Thesis, Department of Management Engineering, Technical University of Denmark.
17. Pine, J (1999) *Mass Customization – The New Frontiers in Business Competition*, Harvard Business Scholl Press, Boston 1999. ISBN 0-87584-372-7
18. Qin, Yanhong and Wei, Guangxing (2010). *Product Configuration Based on Modular Product Family Modelling*. *Journal of Computational Information Systems*, 6(7): 2321-2331.
19. Thuesen, C. (2011). *Understanding Socio Technical Modularity: reinterpreting modularity from Actor Network Theory*. *Proceedings of the World Conference on Mass Customization, Personalization, and Co-Creation* , 2011, University of California Press.
20. Tseng, M. M., Piller, F. T. (2003), *The Customer Centric Enterprise*, Springer, ISBN 3-540-02492-1
21. Ulrich, K. T. and Eppinger, S.D. (2008). *Product Design and Development*. McGraw-Hill, Singapore.

# Appendiks 3

## Modularization in the Construction Industry through a Top-Down Approach

Artiklens forfattere er: Anders Kudsk, Lars Hvam, Christian Thuesen, Martin O'Brien Grønvold, Magnus Holo Olsen.

Artiklen er submitted til "The Open Construction & Building Technology Journal" og er reviwed med følgende respons, som er ved at blive indarbejdet:

Referee comments no.1:

This paper presents modularization in the construction industry through a Top-Down approach which has been used to clarify whether potential exists for using the principles of mass customization to improve efficiency and minimize costs connected with the construction of buildings. A suitable configuration system was successfully developed for use in the early stages of a construction project. However, there are several issues that need to be addressed, before the manuscript is acceptance for publication.

1. Reference numbers should be removed in the abstract. Normally, they are addressed in text and legends.
2. Ref [1] doesn't exist in the first paragraph of Sec. Introduction.
3. Figure 3 & 4 should be explained in detail in paragraph 3, Page 5 and paragraph 1, page 7, respectively.
4. Figures 6-8, 10 are not clear. The authors should let them clearer by maximizing the words in the figures.
5. Line 4 in Sec. Installations: "(see Figure 9." Should be "(see Figure 9).".
6. Line 7-9 in Sec. "The Configuration System": The spaces before and after " user makes his decisions." should be removed and the next words of "Figure 11" is strange. The author should address them clearly.
6. Title of the last section should be "Conclusions" because the authors proposed more than one conclusion. In fact, the text is too long and should be shortened to be a paragraph in it.

Referee comments no. 2:

- The presentation of the paper is good and the research approach seems sound.
- The approach of using principals from mass customization in construction industry is an interesting contribution in the area of Modularization and Configuration of buildings, and provides support to the complex task of harvesting benefits of modularisation in the construction industry.
- The top-down approach seems to be beneficial in order to achieve benefits of high level modularisation without being forced into actual standardisation of building elements.
- A small concern: Lack of verification of the stated benefits of the approach could be improved. Verification points to the applicability of the approach, more than if it is worth applying. This is perhaps due to the nature of the study, which seems as a conceptual off-line project, and not something tested in the tendering of a concrete project.

Other Specific Criticisms:

- 1/ For correct Reference style (Please view the journal's website at <http://www.benthamscience.com/open/tobctj> for Instructions to authors and change the references accordingly).
- 2/ Typographical & Grammatical errors (Kindly correct the manuscript from any native English speaker).

## Modularization in the Construction Industry through a Top-Down Approach

Short Running Title: "Top-Down modularization"

### Abstract

Through the last centuries the manufacturing industry has experienced great improvements in efficiency and cost reductions, but the same improvements have not taken place in the construction industry [1]. Based on the principles of mass customization, known from the manufacturing industry, a case study of a construction company, one of the largest in Northern Europe, has been carried out, according to principles of action research. This approach has been used to clarify whether potential exists for using the principles of mass customization to improve efficiency and minimize costs connected with the construction of buildings; and if so, what they are. The main technical solutions used for residential and office buildings were analyzed using a top-down approach. These solutions were identified and their relations were mapped using a Product Variant Master (PVM) [2]. When a satisfactory overview was achieved of the major technical solutions, a configuration system was made. This is often used to communicate findings from the PVM to the user. Through the work of constructing of the PVM and the configuration system, it was found that a great potential exists for implementation. Based on the findings and experiences gathered throughout the process, it is concluded that the principles of mass customization are best used in the construction industry if used with a top-down perspective.

Keywords: Conceptual Modules, Configuration, Construction, Modularization, Top-Down Modularization, Product Variant Master, Stepwise Implementation.

### Introduction

A major challenge for companies offering highly complex systems and highly engineered customized products is to reduce delivery times, while increasing productivity and the quality of the finished product. To overcome this challenge, some companies in the manufacturing industry have developed and implemented principles from mass customization. [2]. The solution to the challenge can be industrialized construction. Industrialization in this context means the transformation from traditional craftsmanship production to machine-based production [3]. Such industrialization can benefit from the principles of mass customization by allowing individual housing through standardized production and thus keeping costs down and yet increasing quality. This has been achieved in the production of cement factories by F.L.Smidth (FLS), a sector similar to the construction industry. FLS has done this by working with modules and configuration systems, and thereby gained experiences and developed methods of using mass customization. Can these methods and experiences and methods be transferred to the construction industry?

Traditional modularization is done on relatively small objects, produced and sold in great numbers. Compared to this, modularization in the construction industry differs in many ways. In the construction industry, the size and complexity demand untraditional modularization. In addition to the size and amount of objects produced, the subjective demands also differ, due to the individual customer's demands. The size of the market differs as well from the traditionally modularized product market, since construction markets are fairly local. Construction companies operate in limited geographical areas, most often national or regional, where a certain construction style or tradition prevails.

When trying to understand a complex system, two different approaches are normally used [4]. Through the first approach, the top-down approach, the whole system is first divided into a few main components and understood. These components are then divided into smaller components, and so on until a satisfactory understanding is reached. This is done on a conceptual level, which means that all the different components are not described in detail – only the larger parts. An example of this could be a car built on a platform, where in a top-down approach, the focus is on the chassis, the engine, the wheels etc. without going into too deeper details but describing these larger parts of the car. The second approach, the bottom-up approach, first examines the smallest parts and components and then combines them into larger components or parts of the product, until a satisfactory understanding is reached. An example of this could be a detailed description of the locking mechanisms in a car door, which would explain in detail what the different components are and what they do. Then, these components are combined to the lock, then the door, and so on.

When examining a complex field such as the construction industry, it becomes an exhausting task to look at every single detail, as in the bottom-up approach (see the lower part of Figure 1).

Buildings are large, complex structures, which are produced in a much smaller quantities than is normally the case in the manufacturing industry. Buildings are a compromise between many different stakeholders and their views on many different questions. Thus, there are an endless number of possible combinations, which are often chosen on the basis of personal taste and subjectivity. This makes a generalization difficult. The more general technical solutions for a building can, however, be looked upon quantitatively and made configurable in order to reap some

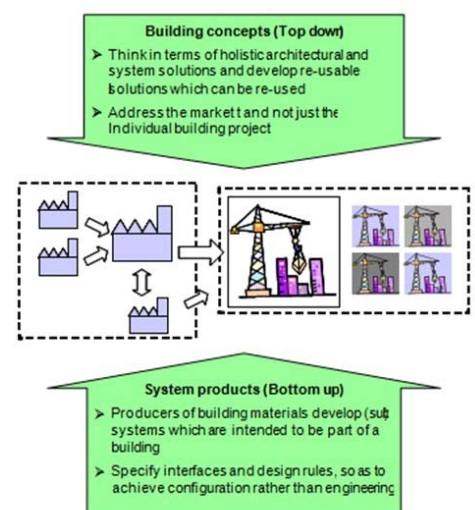


Figure 1 Top-down vs. bottom-up approach.[3]

of the benefits inherent in the principles of mass customization. [5][6]. An analysis of the implementation of mass customization principles in the construction industry has been made in one of Northern Europe's largest construction companies, NCC Construction.

NCC, or Nordic Construction Company, is a Swedish construction company with activities in all of Scandinavia as well as the Baltic countries, northern Germany, Russia and Poland. NCC had a turnover of SEK 49 billion (USD 7.2 billion) in 2010. NCC has a tradition for seeking regional mass customization potential and has carried out such projects in Sweden, Denmark [7] and in Germany [8]. In Sweden, the regional department of NCC carried out a project to construct pre-fabricated house elements ready to be assembled after being shipped to the construction site. In northern Germany, NCC has constructed a platform for the construction of low-cost residential housing [8]. These low-cost houses were constructed through the use of platforms that had certain criteria connected to them. They were to be applicable for 90 per cent of the selected market, be designed with in respect for German architectural and tradition, be flexible enough to produce many different houses, and use a decentralized serial production to enable the building of small projects. These smaller projects were viewed to be beneficial for embracing a greater number of building types, due to Denmark's smaller market.

An implementation of the principles from mass customization can be introduced in several ways. One way is as a total implementation, where every step of the process or product is analyzed, and finally the whole process is changed. Another way is gradual implementation, where parts or sub-parts are separated from the whole process or product and analyzed. Then, the process is changed to fit the principles of mass customization while still fitting together with the rest of the original process or product. The latter method involves a more conceptual approach, since it only focuses on the bigger picture and does not include a complete implementation of the entire product – just the larger modules. Dividing the construction into smaller parts that to be modularized can also be accomplished on several levels - e.g. those levels could e.g. be on a component or a unit level. At the component level, often seen today by façade elements being delivered as finished customized sandwich elements constituting everything from façade cladding to insulation and fittings. Whole units can be customized and delivered ready for installation, as seen in the shaft case or in some bathroom solutions, where the whole bathroom is designed off-site and delivered ready for installation at the site.

In a case study in the construction industry, the hypothesis (formulated in the hypothesis section) which is mainly based on experience from FLS [9], has been tested. This is described in the methods section. The test has been conducted as a research project at the Technical University of Denmark (DTU) in collaboration with one of the biggest construction companies in Northern Europe. Throughout the project, the principles of mass customization have been applied to office and residential housing since these types of housing are most common.

### Theory

A Product Variant Master (PVM) was used in order to analyze the case company and its product range. A PVM is a tool in which a list of the products the company carries in its product range can be written along with their components [10]. For example, a bicycle company can use their PVM to show that they produce three different bikes. These bikes are then broken down into their components: e.g. wheels, saddle, gearing system, pedals etc. The analysis of a construction project's main system is mapped using a PVM, which allows the user to map the insight and the relations between different systems using different views. While these relations are being mapped, such insights as constraints and relational behavior can be added to the different elements of the system to allow for a deeper understanding (see Figure 2).

Through the use of a PVM, it becomes a lot easier to see what the company produces and if there might be an overlap in some of the components, or if some of the bikes might be able to use the same components as some of the other bikes. This leads to a substantial increase in knowledge of the company's different components, along with their properties and relations. This increase in knowledge can then be integrated with a configuration system. The configuration system makes it easier for a customer to choose between viable solutions in order to customize a bike to their liking through a software interface.

In order to go from the idea of using a configuration system to successfully implementing it, seven steps should be followed. First, the commercial aims of developing and implementing a configuration system should be clarified. This clarification is often accomplished by using e.g. a gap analysis to show the expected improvements to be achieved through the use of a configuration system. The second step constitutes an analysis of the product range, typically involving the use of a PVM. The third step is object-oriented modelling, where the method to be used to display the findings from step two is determined. Step four, object-oriented design, constitutes selection of the software to be used, adapting of the object-oriented model to the software, and specifying the programming requirements. Step five is the programming of the configuration software. Step six constitutes implementation of the software in the organization; and in step seven the configuration software is maintained and further developed [2]. Step six and seven were not relevant for this project, due to it being a research project.

The configuration system makes decisions based on constraints and attributes that are interrelated through logical statements. The logic in the program enables the programmer to define solution spaces for the user, thereby guiding the user to a viable solution while giving the user the

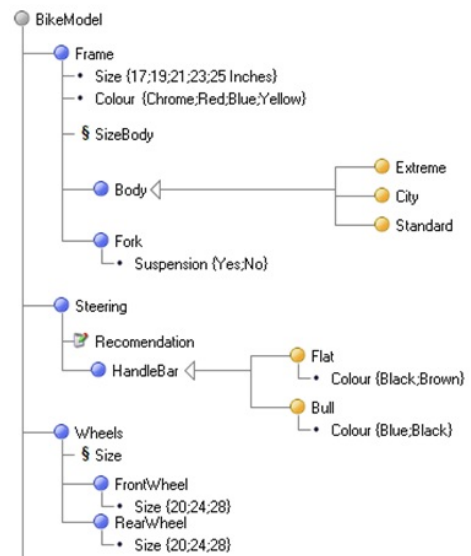


Figure 2 Product Variant Master for a bike



opportunity to affect the solution, and thereby living up to the principles of mass customization. The constraints are based on the answers the user gives to questions based on binary or n-value variables. The answers are then related using “and”, “or” or “neither nor” rules.

The principles of the configuration system are illustrated in Figure 3. The user types in the relevant information he possesses of at the moment into the configuration system. The configuration system then processes this information until a result is produced as output to the user.

FLS has been used as a reference tool in order to compare the case company with another company in testing the hypothesis, as stated in the hypothesis section. FLS is a company that constructs highly complex, custom engineered cement factories. The company has more than 13,000 employees in offices in more than 50 countries around the world. FLS has been the leading supplier to the global cement industry since the late 19th century [11]. As a bid to simplify the earliest processes of manufacturing cement factories, FLS has achieved, through introduction of mass customization principles, achieved a more efficient sales and engineering process.[9]. Through introduction of mass customization principles, a radical redefinition of the company’s product architecture was carried out. FLS has successfully implemented a configuration system, based on a top-down view of their product range, which enables them to improve quality, amount and speed of tenders delivered to potential customers. This hypothesis is based upon the complexity, size and the number of projects FLS has.

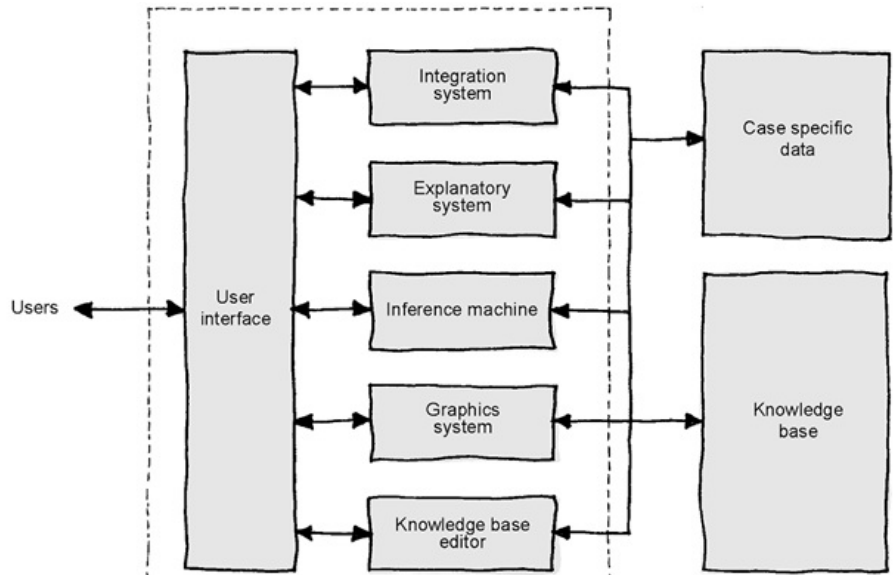


Figure 3 Structure of a configuration system

**Method**

In order to test a hypothesis, a series of steps were used, according to “Building theories from case studies” [12] and Action Research theory [13], were used. A scenario/hypothesis was formulated based on FLS’ experiences. This was done through a four step cycle, based on Action Research theory. The four steps are Plan, Action, Observation and Reflection [13]. These steps are not taken sequentially but partly parallel, where planning and reflection are combined in the fourth step. This is done in order to use an iterative approach in making scenario as correct as possible with regard to the given problem domain. The way this was achieved in our instance, was to formulate a hypothesis was formulated, based upon the experiences from FLS and then form a scenario. The scenario was also made in accordance with the idealistic model, “the good process”, as stated by the Danish construction board [14]. This was then tried out in a construction company. Throughout the process, there have been many iterations that have adjusted the plan and action; however, since this is not the main topic here, it will not be discussed further.

The research undertaken in order to verify whether work and success of FLS is comparable and possible to transfer to the construction industry, has been primarily based on interviews with professionals from this industry. Knowledge about the area of mass customization from other industries enabled us to focus on gathering information from these professionals, and through the application of the theories, to derive potential areas for improvement. Throughout the six month project, more than 35 interviews were conducted, and a workshop was held with 16 different professionals from the construction industry and lectors from DTU.

The workshop showcased the findings in order to receive feedback from the various professionals involved in the project. Thus, it was possible to use the professionals at the workshop to find out whether our findings were correct and to make improvements. The workshop worked as a means of iterating. The general attitude among the professionals at the workshop was an open; they were very willing to answer and ask questions. An introduction was made to the information gathered and the results so far, in the form of the configuration system. The input gathered at this workshop was used to fine-tune the configuration system and make it clearer. Through the workshop, values and criteria were gathered to make a cost-benefit analysis in order see scenario from a more economic point of view.

We then looked at different cases and articles that would be beneficial to use as background for the proving or disproving the stated hypothesis. It was decided that FLS would make a great starting point, and that NCC should be the dominant case. After studying FLS and the case company, we wanted to set some starting points for the validation of the hypothesis. This was done through the definition of a scenario to be used throughout

the project and based on the experience gained from FLS. The knowledge necessary to specify this scenario was obtained through the above mentioned sources interviews with professionals in the industry as well as relevant reports. These reports [15][16] primarily used a bottom-up approach to the industry in attempting to apply the principles of mass customization in the construction industry. The gathered knowledge was systemized using a PVM (see Figure 3). In this project, only the Customer and Engineering views were used due to the nature of the research, which was to look for general concepts and not specific parts.

After a systemized knowledge was gained, it was systemized and programmed into configuration software, and a configuration system was constructed. The reason for using a configuration system was to visualize and test the gathered information, as well as to present the configuration idea to for people not familiar with the mass configuration concepts.

**Hypothesis**

The complex task of applying the principles of mass customization to the construction industry can be related to the FLS case [9] of implementing a configuration system in the construction of cement factories based upon a top-down approach with regard to product range. What FLS does is describe their product range on a conceptual level. This means that FLS does not described exactly what is needed in the smallest detail nor exactly what should be used in order to construct a cement factory. This allows FLS to give relatively precise cost estimates very quickly when making a sales offer for a new project [9]. Breaking down the product range into its smallest details is, however, the most typical way of using the principles of mass customization [2].

What FLS has done is to give their customers some conceptual, general choices upon which to base decision. Thus, there is a defined set of specifications that the cement factory must adhere to, but the specifics of the factory can be determined at a later stage after an agreement has been made. In this way, FLS gains the ability to give fast and relatively precise cost estimates without having to design a completely customized factory every single time, which considers special specifications set by the customer; FLS can reuse a lot of the same components, and knowledge, already used in constructing other factories.

The reasoning behind introducing these measures to the construction industry and making buildings more standardized is to move the customer order decoupling point (see Figure 4) so that more of the building is within a set frame and only the important visible components can be differentiated by the customer.

This allows the customer to choose between different predefined components and technical solutions, instead of receiving a proposal from the construction company that describes the ideas they have for the construction. This helps to make the construction of the building faster and cheaper and gives the construction company the opportunity to optimize the construction and installation of the different components.

When FLS commenced with their development of a configuration system they started by analyzing their product range. Through a great deal of analytical work they managed to break their factories into modules from which they constructed a configuration system. They described their modules on a conceptual level as the modules are quite diffuse and complex, so that the customer does not exactly know what they are getting. They just know that their factory is within the guidelines they set out from the beginning.

The knowledge necessary to develop a PVM (Hvam, Mortensen, & Riis, Product Customization, 2008) and configuration system was obtained through interviews and a workshop at the construction company. It was decided to focus the project on construction of residential and office buildings more than three

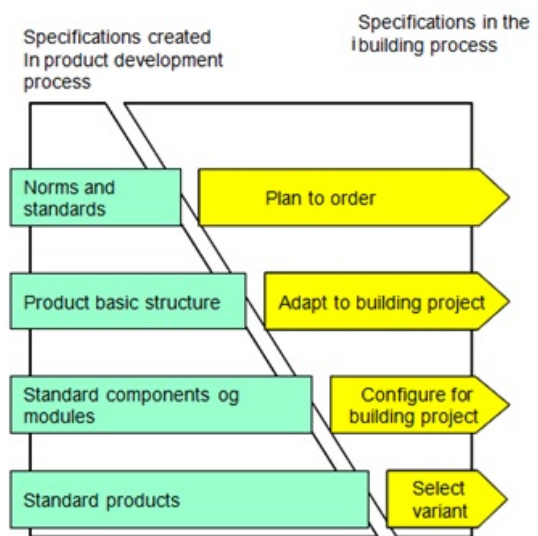
storeys high. This focus was chosen due to the great complexity of these buildings, compared to single unit houses, but also because the case company's focus is on

this sector.

Based on the information collected in the PVM a configuration system was created. The configuration system allows for the information in the PVM to be correlated by using logical statements and a Graphical User Interface (GUI). After such a configuration system is developed and implemented, it becomes much faster and easier to work through the early phases of bidding and winning a quotation. This is because the configuration system presents of the most important decisions, which represents the bulk of the final costs and effects of any decision taken, while supplying guidance to the user.

The configuration program helped find missing information, especially constraints in the PVM, and make a clearer statement to the employees. In return, the improvements in the data obtained through the use of the configuration system allowed new and better feedback from the employees,

**Types of product customization**



**Figure 4: Different spots for the Customer Order Decoupling Point**

resulting in improvements both to the PVM and the configuration system. The configuration system is constructed to move from the traditional, (as-is) way of doing things, to a more streamlined modern, (to-be) way of doing things, (see

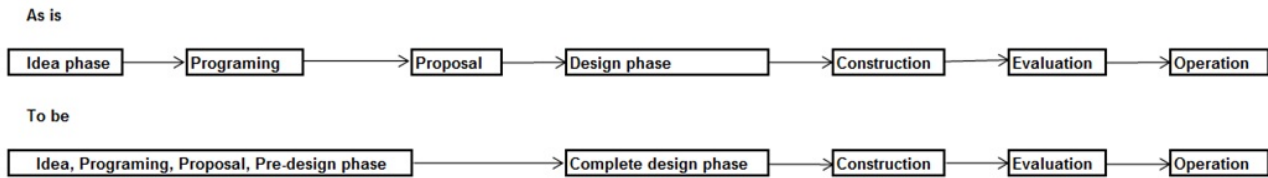


Figure 5). The configuration system will impact the beginning phases of the construction process and melt them, due to the greater amount of information known earlier on in the process.

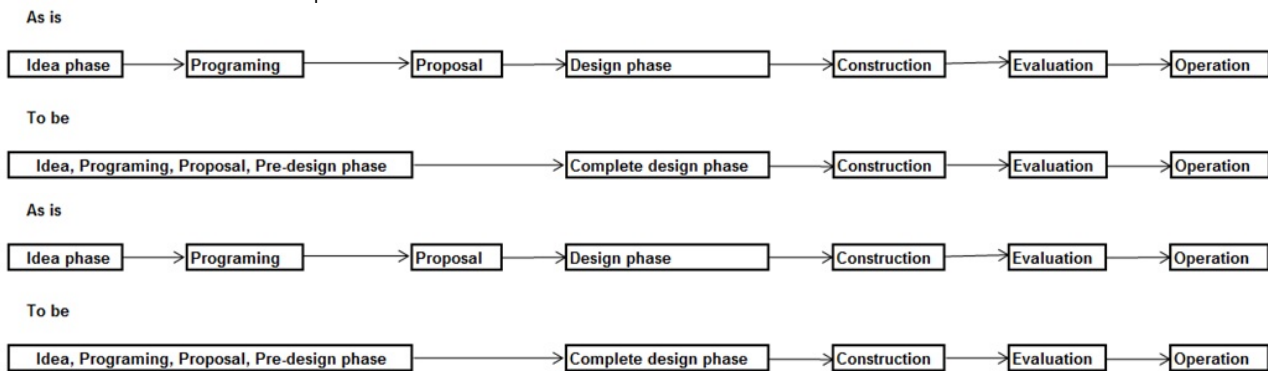


Figure 5: Impact of the configuration system

This will lead to better/more precise decisions in the early phases, which translates into reduction in cost and improvement in quality (Wang, 2011).

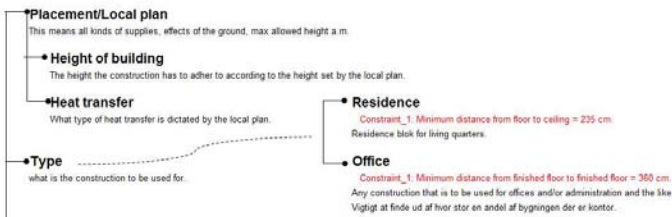
FLS was used as a reference case in order to learn what they did, and thus obtain a guideline in where to go next. This meant that we examined the construction industry in a top-down configuration of the technical solutions in order to obtain a conceptual overview. This was done in the periphery, however, so that if certain aspects were not suitable to the construction industry, they would not be force-fitted. The reasoning behind using FLS as a reference case was the similarities between its form of production and the construction industry. Both industries demanding highly complex and few of a kind products; however, there are several areas in which the two industries are quite different from each other. FLS is a worldwide company with about half the global market for cement factories, whereas NCC has its focus on Northern Europe. But even within such a comparatively smaller geographical area, many different materials, methods and building construction are necessary. The factories FLS constructs are much more similar in comparison with the buildings NCC constructs, since cement factories customers are not being as interested in the aesthetics of the factory. This is in sharp contrast to the demands of NCC's customers, who want a building that expresses their image and their architectural aspirations. In spite of these differences, due to the several aspects of the two companies' products that are very similar, we believe that the two companies, along with their respective industries, are comparable.

### Case Study

Throughout the project, a series of interviews were conducted in order to gain information and knowledge needed to construct a PVM and a configuration system. The information was put into the PVM as it was gathered. Based on the new information in the PVM, new questions were raised and new interviews were held. When the information in the PVM was deemed sufficient, the project entered a new phase the creation of a configuration system. The configuration system was chosen due to its ability to communicate information and help the user make guided and sound decisions. This is done through the configuration system's ability to include or exclude questions and solutions based on answers to questions asked at an earlier stage of the configuration.

From the knowledge obtained through the interviews, we concluded that the most important areas to examine were the larger parts of a construction project, i.e. the static system and the installations. The static system refers to the skeleton of the building: the supporting walls, columns and facades (see Figure 6). All of the gathered information was distributed and analyzed in a PVM. This tool is useful for organizing the product range, and obtaining knowledge about what the company produces and what the rules are regarding how to put them together. It is a great way to start the preliminary phases of constructing a configuration system, in that it makes sure that most of what is important to include in the configuration system is also included in the PVM. The cut-out, shown in Figure shows parts of the customer and engineering view. This shows that choices made in the customer view have direct influences on the engineering view.

## Customer view



## Engineering View

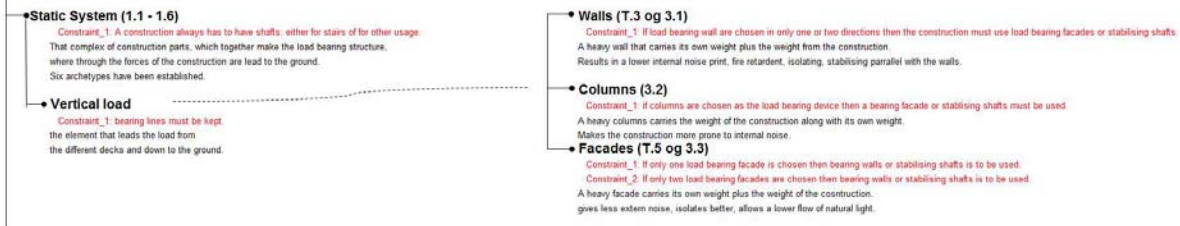
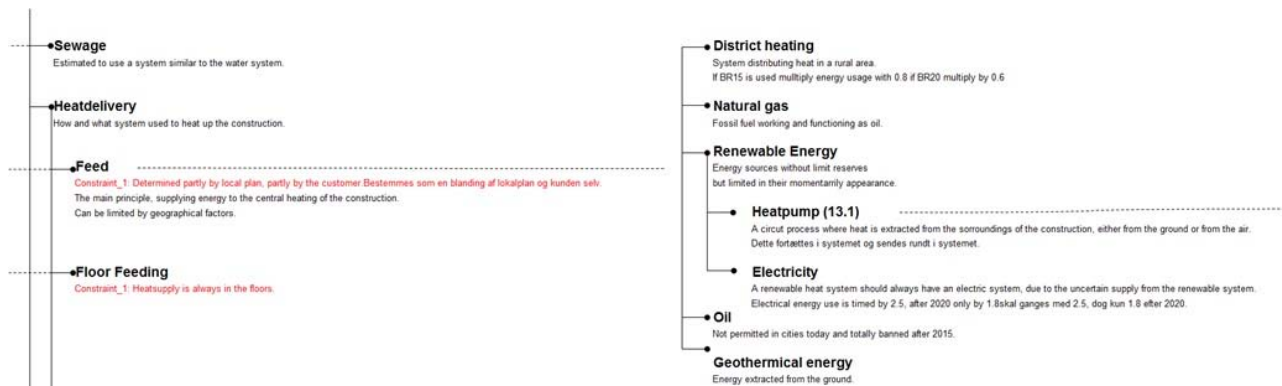


Figure Figure 6: Cut-out of the PVM, this portraying parts of the customer view and the static system in the engineering view

The installations refer to the more crucial installations, which were found to be ventilation, tap water, sewage, heat insertion and electricity. The ways these different installations are led through the building are also been included (see Figure 7) In Denmark, installations such as water, electricity, sewage and ventilation are normally installed together in centrally placed shafts, making one centralized system for the entire building.



Figure

Figure 7: Cut-out of the PVM, this being the ventilation system, part of the installations

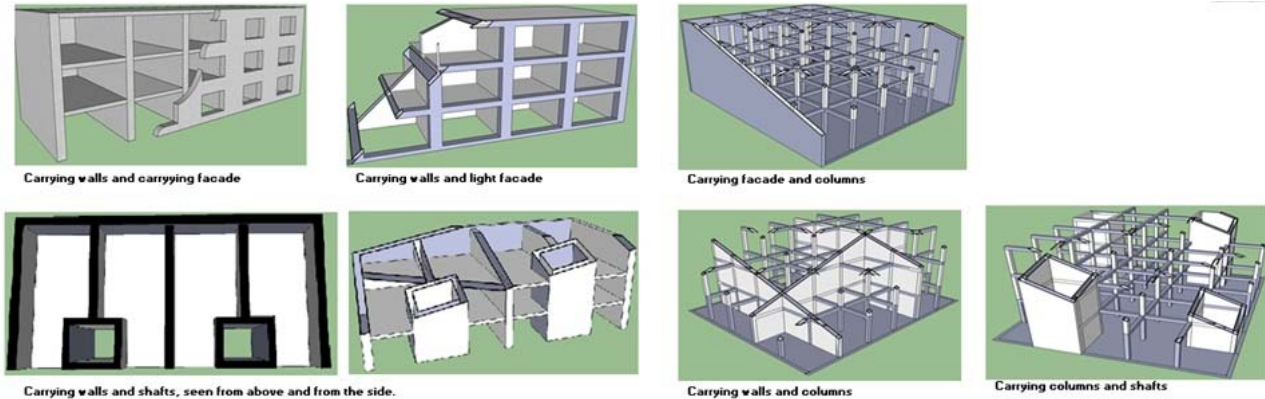
The reason for including these different variables is that the basis for information gathering favoured these areas, and also that these variables form the largest contributors to a construction project's costs. They also constitute a large part of the construction that needs to be planned at an early stage in the construction process, due to the nature of the parts that constitute the skeleton of the construction. Relatively high costs are connected with having to change any decisions regarding the skeleton of a later stage.

All the gathered information and data was put together and displayed in a PVM so that it was possible to elicit many illustrations and cause/effects relationships and break down the different technical solutions. As shown in figure, much effort was put into just describing the most comprehensive of the different technical solutions and not dwelling on every single detail. This was in accordance with the profound top-down approach that was attempted.

Other construction projects were included in the analysis of the construction industry in order to gain an economic point of view. These were projects previously conducted by the case company, so that their own experience was used to construct this new configuration system. This was done by looking at three different projects from three very different cost bases, i.e. one expensive, one average and one inexpensive project.

### Static System

The static system used in construction is normally based on several principles, such as maintaining stability while meeting the spacial proportions wanted by the customer (see Figure 8). In the project, a focus was on defining archetypes of static systems used in residential and office buildings. This resulted in six archetypes made from combinations of pillars, shafts, walls and open- or closed facades, (see Figure Figure



**Figure 8: Overview of the different arc-types identified**

These six archetypes represent the general combinations used when designing the static system of a building. Although it is possible to define six archetypes, it is clear that they are typically not used exclusively but in combinations of the different archetypes, depending on the function of the building.

Some aspects are left out, since they are difficult to include. Especially the more abstract aspects of a construction, such as shape and architectural expression were not included in the static system due to the subjectivity of their perception.

### Installations

Through an analysis of the different installations needed during construction, the focus on the various installations differed. It was decided to include ventilation, which consists of feed shoot, ventilation conduits, ventilation principle and air recycling principle; water and sewage; and heat supply, which consists of feeding and heat transfer and electricity (see

Figure 9. These installations were given different degrees of attention due to differences in importance. One of the most important installations is ventilation due to its size and complexity, both regarding the number of systems and also dimensioning for a well-functioning system. Water and sewage are almost just as important, due to the fact that they are most often connected near each other, and regulations require that they are close to the installation shaft. Heat supply was addressed more than water and sewage but less than ventilation. This was due to the effect it has on energy consumption. Electricity was only addressed briefly, due to the lack of effect on energy consumption and the placement of power plugs.

One of the biggest challenges when systemizing installations was to decide what to include and what not to include. The final choices were made based on the impact on the final building's energy consumption and the availability of information from professionals at NCC.

The major challenge in this area was gathering information. It was difficult for the different professionals to look at their respective domain and simplify it in order to make it applicable to a PVM and a configuration system. By changing the questions and asking people about other peoples' domains, it became a lot easier to achieve a simplified view of the respective domains and thereby get them confirmed by the different professionals in charge.

**Building Dimensions**

Central heating in floors?  No  Yes

Height of plinth above ground [cm]	<input type="text" value="0"/>
Height from floor to ceiling [cm]	<input type="text" value="250"/>
Thickness of deck [cm]	<input type="text" value="22"/>
Height of floor [cm]	<input type="text" value="2.5"/>
<b>Total height from finished floor to finished floor [cm]</b>	<b>274.5</b>

**Figure 9: Cut-out of the configurations system**

### Building Parameters

When all the different input is put into the PVM and configuration system, all the different parameters can be put together, so they can work together intelligently. This means, for example, that when the numbers of stories in the building are typed in, the thickness of the floors etc., the configuration system will calculate how tall the building will be and whether this is in accordance with the previously defined local limit. Then, the results obtained from previously input data will be discussed.

### Height of Building

As a means to ensure that the local plan requirements were endured to, several steps were taken. One step was to ensure that the height of the building was not more than the maximum allowed by the local plan. This was done by means of an equation, (see below), which sums the different elements that constitute the height of the building, and then compares the result with the maximum height allowed by the local plan. This equation then determines whether or not the building should be changed in any way so as not to violate the maximum allowed height.

$$Height\ of\ Building = Y + \sum_{x=0}^x (R + N(Q, V) + D + G(Q)) + I + T + K + H$$

**Table 1: Definition of variables.**

Plinth	Y
Number of Storeys	X
Room Height	R
Lowered Ceiling	N
Installations (w/o. Ventilation)	Q
Ventilation	V
Deck Thickness	D
Floor Type	G
Insulation	I
Roofing	T
Technical Room	H
Crown	K

When enough data had been gathered, we started developing the configuration system. We found the configurations system needed a different layout, comparable to the PVM, so that the user's answers can be used repeatedly and the user does not have to answer the same question more than once. The changed layout also gave the user a sense of getting closer to the building, by starting with the local plan with the first questions, then moving closer to the building, and ending up with questions regarding ventilation and the like.

**Energy Consumption**

The energy framework was examined due to the great amount of government regulation in this area: however, this was done by just using estimations and rules of thumb. In order to decide whether or not a building complies with regulations, a series of guidelines are available. It is difficult to estimate precisely whether a building follows these guidelines or not and today, the calculations are carried out by professionals using software simulation. In the project, it was decided to use recommended values for heat transfer through different parts of the envelope in order to estimate if the specific part was within the general guidelines. These estimations have been drawn from the Danish building regulations (styrelsen, 2011), but they do not ensure that a building is within the legal energy limits. They do ensure that normally it is necessary to change only minor details in order to comply within the regulation limits.

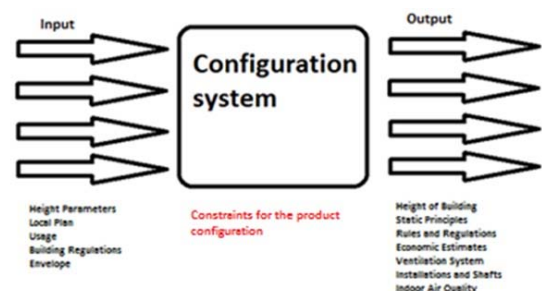
**Economy**

The three areas deemed the most applicable in order to obtain a differentiation in costs were facade, geometry and outfitting. This was achieved through three different price estimates for each of these three areas, which gave a total of 27 different combination possibilities. It is thus possible to give estimates of the cost of on what different parts of the building. It soon became apparent arriving at more precise estimates on the cost of different construction parts is difficult, due to the many parameters that affect them - e.g. for a façade: height from terrain, size of parts to mount, angle of façade, material used, and many more.

These price estimates were found to be quite difficult for the different professionals in the case company to grasp, since they were not being able to simplify their domains in order to make examples for the configurations system.

**The Configuration System**

Figure 10, shows a representation of the configuration system. The user is able to enter different wishes regarding the height of the different elements that constitute the height from one floor to the next - e.g. the height of: the room, the deck and the floor. Based on these wishes, the configuration system gives the user the total height from one floor to the next. These choices can be pre-entered by the program to



**Figure 10: How the configuration system works**

allow the user to only correct the heights if he wishes to do so. The program also supplies explanations and guidance while the user makes his decisions.

Figure 11 showcases a message from the configurator, which indicates one of the questions - asking, in this case, what type of building the customer would like: residential or office – was showcased. There are many questions to be answered when running a session in the configuration system, but many of them are constructed so that they can be deemed not important or removed due to a lack of knowledge at that point in time.

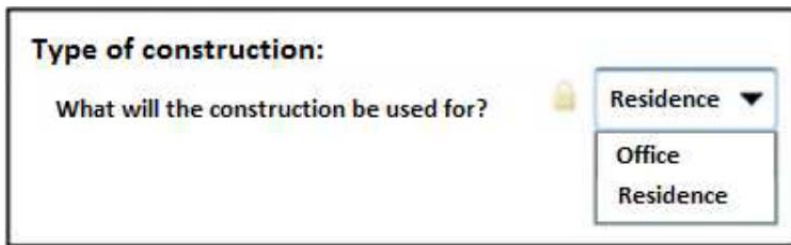


Figure 11: Example from the constructed configurator

#### Evaluation and Expected Benefits

Of the different scenarios for implementation of a configuration system in NCC, one was deemed to resemble FLS most and fitted well with the standard processes used in the construction process at NCC. This scenario was then subjected to a cost-benefit analysis (CBA) in order to showcase the learning curve and the possible revenue gained by NCC through an implementation of a PVM and a configuration system. It was found through estimates, from the workshop, that it would not generate revenue, at least for the first years.

The economic values used for the calculation of the CBA were gathered from the workshop, but the cost of the software was taken from the FLS case (Hvam, Mass customisation of process plants, 2006), and set to be approximately DKK 250.000 (42,000USD). In addition to this cost for software to develop the configuration system, it was deemed necessary to use four man years to develop the configuration system.

After establishing costs and expected saving from implementing such a PVM and configuration system, we started discussing, what the benefits that would result from implementing these tools, i.e. what can we expect the future to look like?

If NCC, through the use of these new tools, could win just one more order every ten years, then the costs of implementing these tools would be paid for. If NCC, through these new tools, could improve their use of the different components, then they would use them better and make the installation or construction faster and more accurate. The new procedures would also help NCC reduce errors and uncertainties, learn of the possibilities for making different technical solutions, and make it easier to showcase how the customer's building is going to look like.

Alternatively, the implementation and maintenance of the new tools and necessary procedures might be neglected or poorly maintained. Such neglect would result in the loss of the investment in the PVM and configuration system.

The results gathered in the PVM and configuration software were put into a matrix, (see Table 2), together with the results found in the FLS case, and compared. This was done in order to estimate whether or not an introduction of mass customization principles in the construction industry

	FLS	NCC
Throughput times of constructions	Considerable reduction	Considerable reduction
Consumption of resources, human and material	Reduction of about 50%	Some reduction
Quality of tenders	More homogenous and with better quality	More homogenous and with better greater quality
Structure of process	Considerably more structure and minimization of risks	Considerably greater structure and minimization of risks
Possibility to show inheritance	Easier to showcase for customers	Easier to showcase for customers
Modularization, amount of repeated structures	Great extent	Less extent

could have the same positive effects as experienced in FLS.

Table 1: Comparison of FLS with NCC.

By the structure of the process is meant that the guidelines used in the process are all known, so that no deviations occur, or at least very few. The possibility to show inheritance relates to easier in seeing the effects of changing one part in of the construction. Modularization relates to what degree the parts of the construction can be modularized.

From the evaluation, it was found that a configuration system would be a beneficial tool for the case company and the construction industry, in general, as long as it is properly integrated with existing ICT-tools, in order to avoid replicative work. It was found that there are several areas with great potential for implementing a configuration system, while other areas present with great hurdles.

The areas with great potential colour coded green. We found that 'throughput times', 'quality' of tenders and the construction process, the amount of 'structure', the means to showcase 'cause and effect', and the 'risks' of the projects could be improved. We deemed that these areas would be impacted in a good way through the implementation of a PVM and configuration system, and make projects run more smoothly.

However, there were some hurdles in implementing the configuration system: 'the amount of projects applicable to a configuration system' and 'the possibility of incorporating modules in the construction industry'. These are not a problem in the construction of cement factories, but they make the approach to a configuration system quite different from the systems in similar industries.

Despite the hurdles, it is still a beneficial tool due to the amount of positive tendencies on other accounts, but experience from the implementation of the configuration system at FLS also shows that not just better results are achieved in the building process; the development of a configuration system also has the advantage of the extensive knowledge gained regarding product range and about how different solutions affect and overlap each other. This knowledge can be used to simplify the number of solutions used in projects as well as reduce the number of parts used due to overlap.

It is crucial to find a way to quantify the different demands and wishes of the customer, in order for a configuration system to be useful in the construction industry. This has been found to be one of the greatest barriers in implementing a configuration system in the case company. The customers in the construction industry tend to have wishes and demands that vary a whole lot more than is the case for FLS. A relatively large number of projects have to be configurable in order for a configuration system to become useful and successful tool for the case company. The exact number of projects is difficult to estimate, but is dependent on possible savings in resources versus the development resources required to developing and maintain a configuration system.

The possibility of modularization is a problem for the case company, compared to FLS, due to the fact that all the different components used for constructing a building are entangled - they all depend on each other, and many parameters go into constructing a building that are subjective and depend on the customer's demands and wishes. In addition, the different building elements have an architectonic aspect, which makes replacing a module one-to-one quite difficult (Eppinger, 2008). This makes a building quite difficult to modularize compared to cement factories. FLS can split their factories into a bunch of smaller components and have them connected through various interfaces, which is not applicable to the construction industry. It is relatively easy for FLS to configure a new factory based on the customer's wishes and demands regarding capacity and energy consumption. This is because the different parameters used in the calculations for the factories are all quantifiable, objective, goals, compared to the subjective wishes and demands customers have in the construction industry – such as architectural demands (Ulf Nordwall, 2011).

Because construction industry has a more open framework regarding what a building can or should not do, in relation to architecture and the customer's individualized wishes, a larger degree of quantification is difficult. This makes it particularly difficult to develop components, because it is important to know which parts a customer, or the construction company, can quantify in order to achieve a satisfactory degree of variation of the buildings, and thereby saleability. This is a problem in regards to architecture, because a greater modularization could easily have a negative effect on the variability possible, thus compromised architectural freedom.

## **Discussion**

Through the data gathering and analysis, several issues connected to implementation of mass customization in the construction industry became apparent. People were in general positive towards the idea, but they often had a biased view of the possibilities. This became apparent when different professionals often suggested that their co-workers' areas could easily be standardized and benefit from implementation of mass customization, whereas their own area were too complex and never used any kind of standard solutions.

Through the work, it was discovered that some areas are harder to implement in a mass customization context than others. These differences are most often due to difference in expectations and demands for diversity that the user or buyer might have.

Although there might be differences in expectations and demands for diversity to some areas of the construction, other areas are of no importance as long as they do their job. These areas, like the static system or installation, are often not clearly visible in the finished construction. However, people often have a lot of subjective demands regarding other aspects, especially architectural aspects i.e. the geometric shape, perceived façade expression, or look. These subjective demands are hard to grasp and indefinable, and therefore customization based on equations and logic statements make these aspects difficult to implement.



FLS is a global company with relatively similar products, since their factories are in many ways being the same, only varying in capacity or other quantifiable measures. This is easily illustrated by the fact that these factories' customers mainly state their wishes in two areas: the amount of cement produced per year; and the maximum allowed energy consumption. This gives FLS, due to a minimum of demands from the customers, a larger domain within which to find solutions, where they are in charge of all the other parameters, whereas the case company's a customer for a building has many different and varying requests concerning interior design, the facade and so on.

The different elements from FLS' development of their configuration system can be translated into a configuration system in the construction industry, subject to the different subjective standpoints and opinions. Despite the results for the two criteria [Table 1], 'tenders' and 'modularization', we consider it beneficial to develop and implement a configuration system in the construction industry. This view is supported by interviews conducted throughout the project in which the interviewees state that there is a need for a configuration system.

The different employees had a hard time making standard solutions in their respective fields, even though they believe a configuration system to be a good idea. The reason for this lack of ability to see standard solutions in their own field might be that these people have too much in-depth knowledge of their field therefore and have a hard time looking at the bigger picture, or maybe they want to protect their jobs. However, in other fields within the construction industry, it became much easier to stay on a shallower level.

### Conclusion

The scenario described in the article is based on the process described by the Danish construction board [14]; hence, it is based on an idealistic model, which is very seldom used 100 percent in reality. However, the scenario is considered to be applicable to real life situations, due to the case company's behavior trying to perform their construction projects in accordance with "the good process".

When conducting the interviews, it became clear that the different professionals had a biased attitude towards the idea of configuration in the construction industry.

Generally, the professionals were positive towards the idea and very helpful when they had an understanding of the project, but often the areas where they saw potential were not the areas they worked with themselves. The area of a certain professional was seen by him to be too complex and detailed to generalize in any way, or at least only in very few areas, whereas the areas of other professionals often seemed easier to generalize and use in a configuration context.

This difference in attitude is assumed to be explained by the following two factors:

First, people have extensive knowledge in their own field and might therefore have a harder time generalizing solutions. They are aware of smaller differences between projects, whereas in other areas, they only possess knowledge of the main components or bigger parts of the solutions. Second, most people do not like the idea of their job being standardised or taken over by computers or employees with less experience and qualifications. They are therefore protective when people bring up such subjects; however, in this case study, this was not experienced.

Through the use of the different technical solutions, it is our view that a suitable configuration system, for use in the early stages of a construction project, can be successfully developed. This can be done using a top-down approach for the technical solutions in the construction industry. It has been shown that it is possible to describe these larger elements on a more conceptual level; thereafter, it would be beneficial to look at the different elements with a bottom-up view, in order to describe these elements in greater detail.

### References

- [1] P.-E. Josephson, Y. Hammarlund, "*The causes and costs of defects in construction - A study of seven building projects*", Automation in Construction, vol. 8, pp. 681-687.
- [2] L. Hvam, N. H. Mortensen, J. Riis, "*Product Customization*", Berlin Heidelberg: Springer, 2008.
- [3] H. Mikkelsen, A. Beim, L. Hvam, M. Toelle, "*Systemleverancer i byggeriet*", Kgs. Lyngby: Institut for Produktion og Ledelse, 2005.
- [4] R. sun og x. zhang, "*Top-down vs. bottom-up learning in cognitive skill acquisition*", Cognitive system research, Vol. 5, 2004, pp. 63-89.
- [5] B.J. Pine, "*Mass customization - the New Frontier in Business Competition*", Boston: Harvard Business School Press, 1993.
- [6] F. Salvador, P.M. De Holan, F. Piller, "*Cracking the code of mass customization*", MIT sloan management review, vol. 50, pp. 71. 2009.
- [7] Building lab dk, "*Paa vej mod fremtidens skakt - En innovationshistorie om praefabrikerede installationskakte til etageboliger*", [http://www.dac.dk/media/9657/skaktan-rapport\\_19-korrektur.pdf](http://www.dac.dk/media/9657/skaktan-rapport_19-korrektur.pdf), 2008, [Jul. 18. 2012]

- [8] C. Thuesen, L. Hvam, "Efficient on-site construction: learning points from a German platform for housing", Construction innovation: Information, Process, Management, Vol. 11, pp. 338-355, 2011.
- [9] L. Hvam, "Mass customization of process plants", International journal of mass customization, vol. 1, pp. 445-462, 2006.
- [10] U. Harlou, "Developing product families based on architectures", Lyngby:Department of mechanical engineering, 2006.
- [11] F.L.S, "Who we are" Internet: <http://www.flsmidth.com/en-US/About+FLSmidth/FLSmidth+at+a+Glance>. Jul. 6, 2012 [Jul. 19, 2012].
- [12] K.M. Eisenhardt, "Building theories from case study research", Academy of management review, vol. 14, pp. 532-550, 1989.
- [13] R. O'Brien, "An Overview of the Methodological of Action Research", Faculty of Information Studies, University of Toronto, Toronto, 1998.
- [14] E. o. Byggestyrelsen, »Den gode proces, Erhvervs- og byggestyrelsen,« 2010. Internet: [http://www.ebst.dk/publikationer/Modelprogram\\_for\\_folkeskolen/kap05.htm](http://www.ebst.dk/publikationer/Modelprogram_for_folkeskolen/kap05.htm). [May. 10, 2012].
- [15] Building lab dk, "Ud i det blaa – En innovationshistorie om Altan.dk", Internet: [http://www.dac.dk/media/9659/BI\\_altanrapport\\_240807\\_LOW.pdf](http://www.dac.dk/media/9659/BI_altanrapport_240807_LOW.pdf), 2007, [Jul. 18. 2012]
- [16] Building lab dk, "Paa vej mod fremtidens skakt – En innovationshistorie om praefabrikerede installationsskakte til etageboliger", Internet: [http://www.dac.dk/media/9657/skakten-rapport\\_19-korrektur.pdf](http://www.dac.dk/media/9657/skakten-rapport_19-korrektur.pdf), 2008,[Jul. 18. 2012]



## Appendiks 4

# Stepwise Modularization in the Construction Industry through a Bottom-Up Approach

Artiklens forfattere er: Anders Kudsk, Lars Hvam, Christian Thuesen, Martin O'Brien Grønvold, Magnus Holo Olsen.

Artiklen er submitted til "The Open Construction & Building Technology Journal" og er revied med følgende respons, som er ved at blive indarbejdet:

Referee comments no.1:

- The presentation of the paper is good and the suggested approach seems sound.
- The approach of using principals from mass customization in construction industry is an interesting contribution in the area of Modularization and Configuration.
- The described case studies provide a suitable basis for the suggested method of stepwise modularisation through a so called bottom-up approach.
- The approach of focusing on a smaller part of a highly complex product seems beneficial, when using principles of mass customization.
- Concern: Complex building systems with several thousand components and internal interfaces are dependent on up-to-date data-structures representing the product and its external interfaces in a computer. The actual workload of defining and updating these internal characteristics in a configurator tool (making the product fit to the external characteristics) and furthermore aligning these with companies' other computer-aided tools in which interfaces are defined and documented, seems rather comprehensive compared to the suggested benefits.
- The reference base of examples in the introduction could be expanded with the Chinese company "Broad Group", which create entire deliveries of high-rise buildings, based on pre-fabricated system elements.

Referee comments no. 2:

The discussion on configuration systems (page 10) could be elaborated further.

As stated, Altan.dk operates the configurator internally, but with the balcony being an integrated part of the buildings' architectural appearance one could have the opinion that the configuration process should take place in relation to the building model. Furthermore, related to an integrated design process, some of these building modules may play a role in the overall performance of the building and should play a part in energy simulations etc. Therefore, the thoughts on the relationship between the configuration system and the building model could be interesting.

However, this might be outside the scope of this article.

Figure 2 and especially Figure 5 appear blurry when printed. You could consider increasing the resolution.

Other Specific Criticisms:

- 1/ For correct Reference style (Please view the journal's website at <http://www.benthamsience.com/open/tobctj> for Instructions to authors and change the references accordingly).
- 2/ Typographical & Grammatical errors (Kindly correct the manuscript from any native English speaker).

## Stepwise Modularization in the Construction Industry through a Bottom-Up Approach

### Abstract

The manufacturing industry has experienced a great deal of improvement in efficiency and cost reductions throughout the last centuries. Despite these improvements in the manufacturing industry, the principles and work methods in the construction industry are still more than a hundred years old. Based on principles of mass customization known in the manufacturing industry, two cases of successful implementation of mass customization and modularization have been investigated as a means of showcasing that it is possible to incorporate standardization in parts of the construction industry. The investigation examined two different companies that have standardized parts of a construction. One, Altan.dk, standardized the method for constructing balconies; NCC Skakt standardized the construction of shafts. Altan.dk standardized their balconies by studying the balconies they previously built and constructing solution spaces in which a configured balcony can be constructed. The information gathered from studying these balconies was then put into a Product Variant Master, so that an overview of the product was achieved. All the information gathered was put into a configurator to help throughout the entire construction process. NCC Skakt

standardized their shafts by studying apartments already constructed and extracting different archetypes of toilets and kitchens. Much information was gathered, which was spread out into a Product Variant Master, so that an overview could be achieved. This led to a standardization of the shafts, defining three types of shafts that make up 95% of the investigated market. Based on the findings and experiences gathered through the standardization, it is concluded that the principles of mass customization of a sub-part can be successful when implemented stepwise. The case shows that substantial benefits can be found through the implementation of modularized construction. It is especially interesting to note that these benefits are achieved through the development of a module with focus on the internal interfaces.

**Keywords:** Configuration, Construction, Modularization, Bottom-up Modularization, Product Variant Master, Stepwise Implementation.

### Introduction

Some industries, primarily manufacturing, have achieved significant efficiency improvements by offering customized products, which are not designed and produced as unique products, but rather selected and composed within a predefined range, through mass customization, product architecture, modularization and configuration [1],[2],[3],[4],[5].

The construction industry, however, goes the other way. Attempts have previously been made to mass produce construction elements, which can be used as a basis from which mass customization takes place (see figure 1). This method differs from traditional mass production in that the customer, within a range of pre-specified boundaries, has the opportunity to individualize the product he buys at a price that is closer to the price of mass-produced products than the price of individually manufactured products [1],[6].

The construction industry experiences a need to develop more efficient construction methods in order to compete in a low-margin market without damaging the architecture of the construction. In order to improve competitiveness and margins, focus on standardizing the product has typically been used [7]. In recent years, a new approach has been applied, based on mass customization principles [8], in which focus has been on the development of integrated system deliveries. This approach has been used for some decades in the manufacturing industry, leading to greater margins and market shares for several companies. Mass customization and integrated system deliveries are often used in the manufacturing industry; successful implementation has created large and complex products. One company that has succeeded in creating such products and reaped the benefits of mass customization is F.L. Smidth, a leading global producer of cement factories. Through customizing the sales phase, F.L. Smidth has reaped great benefits in the form of short throughput times, more accurate price estimates etc. Through integrated system deliveries, it is possible to differentiate to what degree different components of a construction should be standardized, which enables companies to prioritize and differentiate the level of standardization in each module. Within the construction industry in Northern Europe, examples of this method exist. These systems have been developed for office and residential multi-storey constructions and have encompassed entire buildings, often based on pre-fabrication. Examples of such systems are Skanska AB and IKEA, which developed Boklok ([www.boklok.com](http://www.boklok.com)) and NCC AB ([www.ncc.com](http://www.ncc.com)), which developed NCC Komplet. NCC Komplet was terminated after five years and a few projects, however, in 2007, due to lack of confidence with regard to achieving the construction improvements originally expected. At the time of termination, NCC had invested SEK 1 billion in the project. Since NCC decided at this point not to discuss the matter further, access to more information is not possible.

### Background

Few companies have been able to develop integrated system deliveries encompassing entire constructions, due to economic and/or political reasons. This inability is mainly due to the huge investments and risks connected with a project of such magnitude. Also, several projects have been tried and failed, which has left potential developers leery about taking up such a challenge – e.g. NCC Komplet.

An alternative to this one-step implementation is to implement gradually, with parts or segments of a construction modularized in order to minimize the scale and economic risk of the project. This gradual implementation can be approached in two ways, either by a top-down or bottom-up approach. In the first approach, the entire building is analyzed, which makes the entire building the product; in the latter approach, a smaller sub-part of the construction is analyzed and modularized, which makes the sub-part the product.

Through a top-down approach the construction is divided into a few main components and understood in relation to them, which is what F.L. Smidth did in the cement factory construction industry [9]. These components are then further divided into smaller components and so on, until a satisfactory understanding is reached. This is done on the conceptual level, which means that all the different components are not described in detail – only the larger parts. The example of a car built on a platform can illustrate this. Using the top-down approach, the car is examined and broken down into the chassis, engine, wheels and so on – not going down too deep, but describing these larger parts of the car.

Through the bottom-up approach the smallest parts and components are examined first and then combined into larger components, the parts of the product, until a satisfactory understanding of the product is reached. A practical example of this would be a manufacturer that solely produces locking mechanisms for car doors. The manufacturer receives a description of the product explaining in detail what the different components are and what they do. Then, the car manufacturer combines the lock with all the other parts needed, examines and discusses the lock, then the door and so on. This is a continuous analytical process, until the entire car has been analyzed. However, it seldom happens this way in reality; it is only done for smaller parts of the construction. The two principles, bottom-up and top-down, can be used in conjunction; they are not mutually exclusive. They can be used concurrently in such a way that the top-down approach is used to obtain the first overview of the building in which areas of potential modularization is found. These areas are then studied using a bottom-up approach (see Figure 1).

When examining such a complex field as the construction industry, it becomes an exhausting task to look at every single detail of a building using a bottom-up approach. Using a top-down approach, however, would make the analysis much more superficial, even though it can be used to locate areas with great potential for modularization.

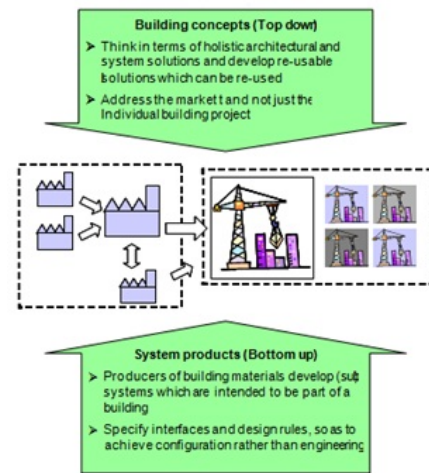


Figure1: Top-down vs. bottom-up approach.

Buildings are large, complex structures, and they are produced in much smaller quantity than is normally seen in the manufacturing industry. Buildings are the result of compromises between many different stakeholders and their views on many different questions. Thus, endless possible combinations exist that are often chosen on the basis of local traditions or personal taste and subjectivity, which make generalization difficult. To describe how it is possible to handle this, an in-depth analysis has been undertaken of two companies, one producing balconies and the other installation shafts in apartments.

The balconies are produced by a small Danish company named Altan.dk ([www.altan.dk](http://www.altan.dk)) that controls a network in charge of a production line that manufactures customized balconies for the construction industry. Their aim is to manufacture standardized custom balconies – this is their product. They have used a bottom-up approach to modularization of the building, selected a single product, and standardized its manufacture. The balconies comprise multipart products that have been standardized through the interfaces within the product, since the outer interfaces are relatively unknown. Altan.dk does not focus only on the physical product, the balcony, but the entire process of installation, customer service and support throughout the product's lifetime.

The installation shafts are made by a subsidiary of NCC that delivers customized installation shafts, both internally to NCC's own projects and to external customers.

Instead of making the sub-parts/products in situ, the modules are delivered as an integrated module to the construction site and therefore only occupy a minimum of space, thus reducing production time significantly. Through this approach, the advantages of a modularization are exploited, and the cost of developing modules is divided into smaller segments, and the company can use expert knowledge in the different areas.

## Theory

Mass Customization – the basic principles of this concept is to create value for the customer by adapting a product to his specific needs. The customer thus perceives that he is receiving a tailor-made product. From the manufacturer's point of view, the product is manufactured from uniform parts that can be produced using a specialized production apparatus; from the customer's point of view, it is a unique product [10].

This means that the idea of customization is to develop a portfolio of products that enables the company to offer the customer a perceived unique product that matches the individual customer's needs. At the same time, the products in the portfolio have a number of common features with respect to design, production and assembly/installation. This means that the products can be considered the same and are therefore easier to produce, assemble and install.

The concept of Mass Customization [1] embraces companies that have previously manufactured mass-produced and uniform products, which start to manufacture these products in a continually increasing number of variants, so as to be better able to fulfill their customers' requirements. Or they are companies that have been making individual and unique products, which start producing a specific product or product family with a specified solution space [11].

In order to analyze a product, regardless of whether you use a bottom-up, top-down or complete modularization approach, a product variant master must be used and therefore explained. In order to divide a product into smaller parts and analyze these parts individually, an overview of the existing product range must be made. This overview can be achieved through the use of a Product Variant Master, PVM.

Product Variant Master – the PVM allows the user to map relations between customer wishes, engineering solutions and parts used for a specific product. When a thorough analysis of the product has been carried out, the user will have an extensive overview of the requirements of the market, the technical solutions and the product’s sub-systems, along with their correlation with other sub-systems and parts. This correlation is arrived at through the definition of parts as either being ‘part-of’ other parts or ‘kind-of’ parts [12]. For a bike, the ‘part-of’ parts are e.g. the body, wheels, and steering (Figure ). The ‘kind-of’ parts are those with several options for e.g. the body frame, such as mountain bike, city bike or classic bike. When the different ‘part-of’s and ‘kind-of’s are found, different attributes and rules can be created in order to define when and how different parts are related. Frame attributes could be the sizes the frame is available in, or the colors possible to choose from. A rule for the wheels could be that if the front wheel has been chosen to be 20 inches, then the rear wheel has to be 20 inches.

In order to develop and gain the advantages of mass customization, a product can be divided into modules. A module is a sub-system of the product with clearly defined boundaries and interfaces to other modules or the user of the product. It is a standardized part of a product that can be used over and over again [13]. The PVM is a tool that can be used to help decide where and how to define the different modules of a product, since the process of making the overview gives increased knowledge. When a module has been decided upon, it has to be documented, and especially the boundary interaction with other modules must be stated precisely, since this is the way the module connects and interacts with other modules in order to constitute a finished and functioning product. In the construction industry, the ventilation system or the installation shafts could be defined as modules.

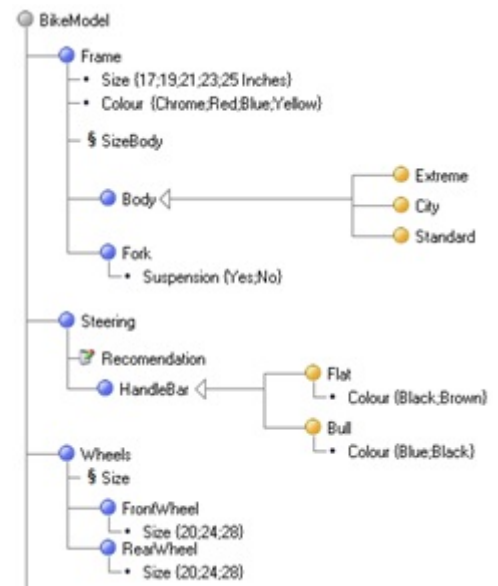


Figure 2:Product Variant Master example

After developing these modules, a configuration system can be developed for making customized products, while at the same time exploiting the mass customization principles. A configurator is software that defines, based on rules, attributes and constraints, a solution space for the user. This allows the user to design products to his needs/demands, while still keeping costs down. The program is based on options that are restricted by rules and conditions, which in turn are based on binary or n-value variables [14]. The former type variables cover, e.g. if the product is a vehicle, such questions as: Would you like a car or a truck? The n-value variables include such questions as: What colour would you like your vehicle to have? The answers would be yellow, blue, green etc.

These options are then combined with expressions such as ‘and’, ‘or’ and ‘either or’, which make it possible to grasp a lot of different options regarding the product and make a shortlist that can be transferred to a validated design to be used in production. Examples of output benefits would be that the customer experiences that ordering their product is faster, and the seller finds it easier to estimate when the product is ready for delivery.

Modularized products can be developed in entrepreneurial companies through the application of the mass customization principles. Using these principles to gain insight into the different sub-systems and to find potential areas of integrated system deliveries allows companies to find the areas with the greatest integrated system delivery potential. This approach would alter current construction methods, due to that fact that much construction would be carried out in an intermediate step instead of at the construction site.

**Method**

In order to obtain some theoretical basis for implementing stepwise modularization in the construction industry, two cases were studied and used as preliminary theory, as described in “Building theories from case studies” [15]. The two cases that were used to gather knowledge, which was to be translated into theory, were Altan.dk and the shaft project of the construction company NCC Construction A/S. Both companies have taken a bottom-up approach, examining the smaller parts of a construction in order to modularize it. These two cases were studied; the process used was analyzed; and the process is described in the following sections.

A way of looking at the construction industry upon modularizing it is through a top-down approach, where a construction can be understood through a conceptual view of the standardized technical solutions. The same methods and tools are used when looking at the construction industry from a top-down approach in a very different way. In the top-down approach, an analysis is undertaken by putting the information gathered into a Product Variant Master (PVM), which structures the knowledge so it can be transferred into a configuration system.

The main difference between the two ways of looking at a construction is strongly reflected in the way a PVM is used. In the top-down approach, because it is on a more conceptual level, the product part view [1] is neglected; in the bottom-up approach, due to it being a lot more specific and on a much smaller scale than an entire construction, the product part view has been integrated into the PVM.

The description and evaluation is based on “Making product customization profitable” [16], where Mortensen et al. set up four areas that are important for successful product customization. These areas are, Market, Product assortment, Production supply and Organization. The analysis and conclusions in this article are based on, but not fully separated into, these areas, and describe opportunities for and examples of modularization in the construction industry.

#### **Altan.dk's background**

Altan.dk is a company that manufactures balconies, has grown from a small traditional entrepreneur company, Ringsted Bygningsentreprise. They started a modularization project supported by funds from Realdania in which they explored the basis for implementing modules and system deliveries in the construction industry. This proved successful, and in October 2006, Ringsted Bygningsentreprise decided to spin off one of its subsidiaries in the form of Altan.dk. This subsidiary's aim is to manufacture standardized custom balconies – this is their product. They found a market to which they believed they could deliver customized, attractively priced, and high quality balconies for use in construction projects or to assemble on already constructed buildings [17].

They used a bottom-up approach to the modularization of buildings, found a single construction part, and standardized its manufacture and installation. The balconies are multipart products that have been standardized through focus on the interfaces within the product, since the outer interfaces are relatively unknown. Altan.dk focuses not only on the physical part, the balconies, but the entire process and the equipment used for installations, customer service and support throughout the product's lifetime.

Altan.dk does not, however, manufacture the parts that make up the balcony; they design and act as middlemen to ensure that the suppliers deliver the parts that can then be assembled into a complete balcony. The balcony is installed by one of Altan.dk's specially trained workers.



**Figure 3: One of Altan.dk's balconies.**

In order to manufacture more than 2,000 balconies a year, solely for the Danish market, Altan.dk made a PVM to obtain a breakdown of the product list in a user-friendly form. After gaining an understanding of the different parts and rules and manufacturing principles used to construct such a balcony, this knowledge was integrated into a configurator [1].

Before starting the process of development, an interdisciplinary project group was established. The group comprised: a specialist from Ringsted Bygningsentreprise, later Altan.dk, static engineers from the consulting engineering company Bascon, configuration system experts and suppliers from 3D Facto, product and product family development consultants from Institute for Product Development (IPU), and the two suppliers of steel and aluminum, Kecon and Weland respectively. One of the main focuses of the development project was reduction and control of variants. By using a PVM, the balconies were separated into two main categories, steel and aluminium. For example, the number of different hole dimensions in the aluminum parts was reduced from 23 to five, and the number of colors was reduced from approximately 40 to ten. These ten colors fulfil approximately 90% of the customers' requirements. To make sure that such reductions would not cut off a central part of the market, the company made a number of user surveys. These surveys turned their entire mindset 180 degrees, from an engineering perspective from where the balcony is an external construction part mounted on the building, to a user perspective from which the balcony is an expansion of the home. This change is very apparent in the company's sales brochure. Before, almost all the pictures were taken from outside – a house with balconies; now, almost all the pictures are taken on the balcony or from inside the home, showing access to the outside [17].

#### **The NCC shaft' background**

The Danish branch of one of northern Europe's largest construction companies, NCC, developed a prefabricated and configurable installation shaft along with several partners. Today, NCC supplies this prefabricated installation shaft to construction projects both inside and outside the company.

From 2006 to 2008, together with the architectural firm, RH arkitekter A/S, and the consulting company Valcon Innovation, they developed an integrated system delivery that is a prefabricated installation shaft based on a bottom-up approach. This project was sponsored by the Realdania Foundation, which was very important, because normally contractors, unlike e.g. manufacturers, have no tradition for long-term investments in product development. The reason for starting the project on customizable shafts, but not any other construction parts, is that the shaft is characterized by a relatively intense workload concentrated in a small area to make a part of the construction that most customers do not care about as long as it works. An analysis at NCC concluded that more than 300 different operations, divided among nine to ten professions are required in an area of approximately 60x80 cm with only one access door and harsh working conditions and positions [18].



The main goal of the shaft project was to create a modular shaft to be configured so that it can fit almost any apartment block and be constructed at an off-site plant before being shipped to the construction site and installed. A pre-assembled solution for the shaft would solve many of the problems often experienced on construction sites. It is also an area that few construction supervisors find interesting to deal with.

Another reason for choosing the shaft as an object for integrated system deliveries is that during the construction design, the architect does not really care about the shaft and just wants it as small as possible so that it does not interfere with the architectural experience of the construction and leaves more space for revenue-generating activities. It is an area that is not supposed to be seen. The architectural experience is important for the customer, because it contributes a lot to the image of the company or the customer as an individual. When trying to modularize constructions, architecture is often one of the main barriers; however, since shafts are hidden parts of the building that just needs to work and not be seen, it functions as a great starting point for developing modules.

A thorough investigation was carried out as the first step in the development of the shaft, in order to define the different interfaces and their nature in the existing constructions. This was done through an investigation of already established buildings. The main aspects in focus were kitchens and apartments, which are the two main sources of installations for the shafts. In order to obtain a sufficient amount of data, 24 standard apartments and seven bathroom archetypes were investigated [18].

From the investigation of these archetypes, three shaft designs were made. By using two of them, 80% of all the apartments and kitchen archetypes were accounted for; if the third shaft design were used, a staggering 95% of the all apartment and kitchen archetypes would be accounted for [18].

When designing these shafts in a modular context, external consultants from the manufacturing industry contributed their experience with making modules. Inclusion of these external consultants resulted in a solution principle based on experiences and methods traditionally used in the manufacturing industry.

The information gathered from the research was broken down and gathered in a PVM. This was done in accordance with three different principles. The first principle is to construct the PVM in a manner so that the first part of the PVM showcases the customer's requirements for the different shafts. The different choices made by the customer when ordering a shaft relate to the size, elements and performance of the shaft. The next part of the PVM, the engineering view, describes what the engineers have to know in order to construct a shaft for the construction. The last part of the PVM, the part view, shows all the physical part of the product, the bolts and nuts.

The choices made regarding the customer's requirements then have some direct effects on the second principle, which is that if a narrow shaft is chosen, then it has to be outfitted with narrow pipes and tubes. This information is then sent to the product parts list and determines the size of the pipes and tubes all in all. From this, a complete specification is made of the design and the placement and function of the different interfaces.

### Managing the Interfaces for both Cases

During the development of the modules, the main focus was on the development of internal interfaces between the elements of the product; several external interfaces have therefore not received the same amount of attention. An example of an external interface that was defined is the interface between the shaft and the toilet. This interface was defined so that the toilet would always be situated adjacent to the shaft, thus providing easy access for the necessary installations between the toilet and the shaft. An example of an external interface that is not defined and is therefore left to an individual assessment in each project is the fire-related interfaces – more precisely, the fire-related interfaces connected to assembly, heavy walls, prefabricated bathrooms, and other technical fire-related conditions. The equivalent for Altan.dk is their focus on the internal interfaces, while leaving the external interfaces less defined. This was especially an issue in the earlier phases, and less so when the product matured.

Besides the shaft project and the bottom-up approach, NCC is also developing a "construction concept system" based on a top-down approach, working with the design and decisions made for the entire building. The modular shaft is an integrated part of the construction concept development at NCC, and in these projects, these otherwise undefined interfaces– such as the fire requirements – are defined. One might wonder why external interfaces have not been decided on to a greater extent. The reason for the lack of defined external interfaces is the lack of documentation for the external modules to which the shaft connects. Due to this lack of documentation, the need for project-specific interfaces between the shaft and the surrounding modules is imminent. Through experience, NCC has discovered that it only adds value to the project, if the interfaces are defined after the surroundings have been defined in some manner, which is done in the NCC "construction concept system".

When we consider the entire building, Altan.dk applies stepwise modularization, but if we only consider Altan.dk's product, we see a full modularization. In this modularization, Altan.dk has full control of all the internal interfaces of their product, the balcony. The external interface, in terms of the mounting, is also well described and based on five standard solutions; never the less, this part needs some project-specific design and calculations, which are performed by the static engineering company, Bascon. Another external interface, which is based on some standard solutions but is not fully standardized, is the access to the balcony. This door, with all its mountings and frames, also needs some degree of project-specific design.



Figure 4: The NCC Shaft

## Configuration Systems

Altan.dk has developed a configurator that contains materials, processes and machinery. Their configurator is used solely internally, within the company, which means that there is no direct interaction between the customer and the configuration system. Instead, Altan.dk has a salesperson handling the interaction with the different customers. The salesperson looks at where the balcony is to be located and figures out what the customer actually wants. The customer does not interact directly with the configurator, because unlike a bike, laptop, cell phone etc., a balcony has to be an integrated part of the buildings' architectural appearance – it becomes attached to the side of the apartment building. Also, Altan.dk does not wish to publish its solutions and product range. The customer would need a lot of assistance in measuring where the balcony is to be located and also in using the configurator. Therefore, Altan.dk operates the configurator internally.

NCC wishes to implement a configuration system that would have to entail both shaft and bathroom, due to the architectural focus. NCC has worked with four different scenarios and has been adamant that the architect must still make the layout decisions of the areas in question, without having specific knowledge of who and how the bathroom and shaft will make and produce the final design. The actual design process is the only thing being modified, and only this process is directly supported by the configuration system. It has been shown that a good and varied range of opportunities exists for using configuration systems in the design of shafts and bathrooms.

## Effects for both Companies

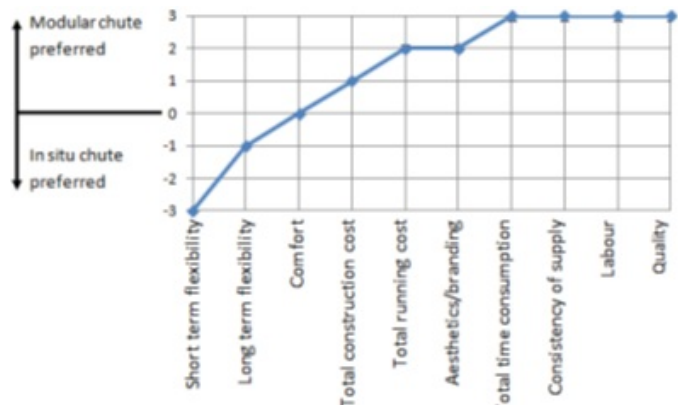
Altan.dk and NCC Construction have both implemented modules, based on a stepwise modularization based on a bottom-up approach. The stepwise modularization has given both companies projects that are manageable. Both companies have experienced a change in the way their organizations function: The process has been more streamlined, and with the well-defined product structures, they have obtained a much better overview and more knowledge about their product. This is naturally most significant at Altan.dk, where the new structure embraces the entire product, and where the product is more mature than at NCC.

The use of a configurator at Altan.dk has made it possible for them to handle their tendering, design and planning with fewer people. At the same time, the configurator, and its development, ensures that all parts of the company know the company's products and name it in the same way, something they have not experienced before.

Through the introduction of modularized shafts, NCC Construction has achieved a more standardized product. This has made the shafts easier to install and lowers the amount of resources needed to create, construct and install the shafts.

The new shaft is a modular installation shaft, which has the advantages of both product customization and mass production. NCC has made a systematic comparison between the in situ shaft and the modular shaft, based on 10 parameters identified as being important (Figure 5).

This shows that the prefabricated shaft offers a number of benefits, without costing a lot in long-term flexibility; however, it does decrease especially short-term flexibility, and therefore requires good planning in the early phase. The standard solutions have made this planning much easier, but it is no longer possible to wait and figure out solutions onsite.



## Discussion and conclusion

### Market

Altan.dk has chosen only to do business directly with the client and does not work as subcontractor. NCC has chosen to sell the shaft as an integrated system delivery to both internal and external projects, thereby also working as a subcontractor. The strategies follow the very different nature of the two products. No end users buy an installation shaft as an individual product, but only as an integrated part of an entire construction. This is in great contrast to the balcony market, where the product is in very direct focus by the end user, and where the replacement or addition of balconies can be the entire project. It can also very easily be separated as an individual project or contract.

### Product assortment

In relation to the product assortment, the two case companies have made some different choices. Altan.dk has chosen to focus their entire product assortment on a specific part of the market, the balconies. NCC has chosen to modularize a small part of its product assortment and combine it with other strategies, such as concept buildings based on a top-down approach.

Both companies, and especially NCC, have mainly focused on the internal interfaces. The companies have fully described these interfaces to insure optimal production and quality, according to the supported range of the product. The external interfaces are more individual and related to the specific project, and both companies require a certain amount of individual design to handle these interfaces to other construction parts/modules that they cannot fully control.

The two companies have chosen two different strategies to control product variance. Altan.dk uses direct contact to the customer, to guide the customer in choosing a solution that fulfills his functional and architectural requirements within Altan.dk standard solutions. NCC has chosen a construction part where all the requirements are purely functional; e.g. almost the only relation to the architectural design is the size of the shaft. This gives NCC a product that they only have to optimize and thereby vary according to these functional requirements, a job the designers at NCC can handle pretty independently from the rest of the building design process.

### **Production supply**

Both companies have chosen a strategy which is very closely related to their background as entrepreneurs or contractors. The design is always made by the companies themselves or their strategic partners (Bascon for Altan.dk). None of the companies produce the physical components themselves, but have a number of fixed suppliers making the components. Altan.dk always does the onsite montage, while NCC normally does the onsite montage on their own projects but let the customer do it on external projects. Thereby, NCC's role is more that of a construction product supplier, while Altan.dk maintains a close relationship to the client.

### **Organization**

Altan.dk has most purely located itself as chairman for the entire organization, from sale to post-sale. Not all the functions are performed by Altan.dk itself, but they are in control of the entire organization. NCC has focused precisely on a general change in the way construction projects are organized. It has changed its roll from that of contractor with solutions designed by architects and engineering companies, to a system supplier that designs the solutions.

### **Overall conclusion**

Through the cases, it has been shown that a number of benefits can be gained through implementation of modules in the construction industry. This has been done by focusing on a bottom-up approach to a product, i.e. by describing one specific part of a construction in great detail. This has been done in order to optimize a smaller part of a construction, neglecting the rest. In this way, the companies have gained a substantial amount of information and been able to handle it.

In addition, focus has been partly on parts of a construction. In the case of NCC Construction, this is a part that has no direct impact on the end user, at least no impact they are aware of. Altan.dk, however, works as an organizing unit. They install the balconies themselves and are in charge of organizing the construction; however, they are not in charge of manufacturing the balconies. They have their configuration system within the company – the customer does not see it – and pull strings from their subcontractors. One reason for not having the customer perform the work on the configurator is they are able to use the configurator and then hire another company to do the work. The use of a configurator has proven beneficial for Altan.dk, because they can easily see what has to be done and which strings are to be pulled.

We have seen that it is possible to streamline the processes that go into making parts of a construction. This has been done through a few different tools that have been chosen so employees in charge of the analytical work can gather substantial knowledge of the company's product range. Both in the case of Altan.dk and NCC Construction, they have done this through the use of a PVM. With this tool, they have gathered all relevant information about the product range – i.e. parts, rules, constraints and attributes – and then used this information to map the companies' actual products. The gathered information was then analyzed and has led to the construction of a configurator that takes all the information, added input from a salesperson in cooperation with a customer, and performed a calculation of what is needed to fulfill the requirements. This is then showcased for the customer and processed through the company, so that production of the specific product can begin.

### **References**

[1] L. Hvam, N. H. Mortensen, J. Riis, *Product Customization*, Berlin Heidelberg: Springer, 2008.

[2] A. Joneja, N. K.S. Nevilli, "Automated configuration of parametric feeding tools for mass customization", *Computers and industrial engineering*, vol. 35, pp. 463-466, 1998.

[3] V.B. Kreng, T. Lee, "Modular product design with grouping genetic algorithm—a case study", *Computers and industrial engineering*, vol. 46, pp. 443-460. 2004.

[4] L. Hvam, "The Rulers Factory — a tool for learning product modeling techniques", *Computers and industrial engineering*, vol. 35, pp. 29-32. 1998.

- [5] J. Jiao, M.M. Tseng, M. Mitchell, V.G. Vincent, F. Lin, "Product family modeling for mass customization", *Computers and industrial engineering*, vol. 35, pp. 495-498. 1998.
- [6] F. Salvador, P.M. De Holan, F. Piller, "Cracking the code of mass customization", *MIT sloan management review*, vol. 50, pp. 71. 2009.
- [7] S. Bertelsen, "Bellahøj Ballerup Broendby strand – 25 aar der industrialiserede byggeriet", Hoersholm: Statens byggeforskningsinstitut, 1997.
- [8] D. Benros, J.P. Duarte, "An integrated system for providing mass customized housing", *Automation in construction*, vol. 18, pp. 310-320, 2009.
- [9] L. Hvam, "Mass customization of process plants", *International journal of mass customization*, vol. 1, pp. 445-462, 2006.
- [10] B.J. Pine, "Mass customization - the New Frontier in Business Competition", Boston:Harvard Business School Press, 1993.
- [11] C.L. Thuesen, C.C. Claeson, "The Long Tail and Innovation of New Construction Practices : Learning Points from Two Case Studies" in *Open Building Manufacturing Key Technologies, Applications, and Industrial Cases*, A.S. Kazi, M. Hannus, S. Boudjabeur, Manubuild, 2009, pp. 49-64.
- [12] U. Harlou, "Developing product families based on architectures", Lyngby:Department of mechanical engineering, 2006.
- [13] A. Ericsson, G. Erixon, "Controlling design variants – modular product platforms", Dearborn:Society of manufacturing engineers, 1999.
- [14] R.W. Bourke, "Configurators: A Status Report", APICS - the Performance Advantage - American Production and Inventory Control Society, vol. 8, pp. 42, 1998.
- [15] K.M. Eisenhardt, "Building theories from case study research", *Academy of management review*, vol. 14, pp. 532-550, 1989.
- [16] N.H. Mortensen, L. Hvam, P. Boelskifte, C. Lindschou, S. Frobenius, A. Haug, "Making product customization profitable", *International journal of industrial engineering : Theory applications and practice*, vol. 17, pp. 25-35, 2010.
- [17] Building lab dk, "Ud i det blaa – En innovationshistorie om Altan.dk", Internet:  
[http://www.dac.dk/media/9659/BI\\_altanrapport\\_240807\\_LOW.pdf](http://www.dac.dk/media/9659/BI_altanrapport_240807_LOW.pdf), 2007, [Jul. 18. 2012]
- [18] Building lab dk, "Paa vej mod fremtidens skakt – En innovationshistorie om praefabrikerede installationsskakte til etageboliger", Internet:  
[http://www.dac.dk/media/9657/skatten-rapport\\_19-korrektur.pdf](http://www.dac.dk/media/9657/skatten-rapport_19-korrektur.pdf), 2008,[Jul. 18. 2012]



# Appendiks 5

## Supporting Design Processes by Means of Configuration

Artiklens forfattere er: Anders Kudsk, Lars Hvam, Christian Thuesen

Artiklen er submitted til "The Open Construction & Building Technology Journal" og er revied med følgende respons, som er ved at blive indarbejdet:

Referee comments no.1:

- The presentation of the paper is fairly good, and the analysis of how different configurator systems can support design process of a product belonging to the construction industry is an important contribution in the research area of engineering configuration.
- The analysis of the four different types of configurator systems is comprehensive, and the comparison between them and stated conclusion seems valid.
- Concern: The functional requirements for the case company are specified in an unstructured natural language. This introduces lack of quality in the requirements test, such as missing information, ambiguity, wordiness etc.
- Concern: The arguments for choosing the four scenarios don't seem to be clear (for this reader anyway). A more thorough explanation would improve the understanding and validity of the selection criteria.
- Concern: The missing detailed information on "Graphic Configurators" creates some speculative assumptions when comparing price and risk for the scenario. Is it not possible to get more information from vendors or users of this configurator type?

Referee comments no. 2:

### 1) General aspects

- There are many language quality problems. Sometimes it hinders the clarity of the content. The revision of the text by a native English speaking person is recommended.
- The structure of the paper is not clear. It is necessary to number all sections and subsections;
- Figures are not introduced in the text (e.g. figure 3);
- The quality of Figure 3 is very low;
- There is no picture in Figure 7;
- Table 1 does not have a title.

### 2) Scientific quality

- the title of the paper is generic and not objective. It should direct the reader to the real content of the paper and the paper does not address the "Supporting Design Processes" in general but it presents a process to supporting the design of a toilet and the placement of an installation shaft;
- Abstract: it must objectively introduce the content of the paper. What is the importance of this paper for project teams? What are the main findings? What is the contribution for the state of the art?
- Abstract: it states that the aim is to present "(...) a configuration that architects can use is designing bathrooms and installation shafts" and the paper only discusses the position of the bathroom elements.
- Introduction: the sentence "(...) which NCC can develop and offer to the market" sounds as publicity and this is not suitable to be published in scientific papers;
- The case: the installation shaft should be presented in detail (horizontal /vertical / both) and for what kind of installations (water supply, water drainage, ventilation, etc.).

- Method description (Pag.7): please remove the 4th paragraph, since it adds nothing to the paper content;
- CAD/BIM Object configurator (pag. 19): there is no connection between the enumeration (last paragraph) and the text above;
- Conclusion and Perspectives: it should be further developed and summarise the problem, the contribution of this paper to overcome the problem and what is open for future research.

Other Specific Criticisms:

1/ For correct Reference style (Please view the journal's website at <http://www.benthamscience.com/open/tobctj> for Instructions to authors and change the references accordingly).

2/ Typographical & Grammatical errors (Kindly correct the manuscript from any native English speaker).

## Supporting Design Processes by Means of Configuration

### Abstract

The aim of this research is to discover how configuration systems can support the design process of a product when a high degree of variation is required, and there is thus a very open or endless space for possible configurations. Traditionally, research on product configuration and configuration systems is mainly focused on products with a limited number of possible configurations and on configuration technologies supporting this kind of configuration e.g. [1],[2]. This article is based on an industrial case and sets up four scenarios for how design can be supported by four different types of configuration technologies. The four scenarios are evaluated in relation to a number of functional and technical requirements. The case company is the construction firm, NCC Construction Denmark A/S, which has developed a prefabricated and configurable installation shaft, and wishes to develop a configurator that architects can use in designing bathrooms and installation shafts.

**Keywords:** Configuration, Expert systems, Prefabrication, Regulations, Handicapped persons, Installation, Sanitary engineering, Shafts.

### Introduction

The construction industry has not achieved the same productivity gains as other industries that produce physical products. This applies to both the price per square foot and quality, and may be related to the building production method, which today is characterized by unique one-of-a-kind projects [3]. The industry's companies focus on individual projects and not on having a range of products to offer to the market, which a company can specialize in producing.

Other industries have achieved significant efficiency improvements by offering customized products that are not designed and produced as unique products, but rather selected and composed within a predefined range, through mass customization, product architecture, modularization and configuration [4],[5],[6],[7].

This method differs from traditional mass production in that the customer, within a range of pre-specified boundaries, has the opportunity to individualize the product he receives, and still at a price that is closer to the price of mass-produced products than the price of individually manufactured products [8],[9].

Mass-produced standard houses, which were seen especially in the 1960s and 1970s, are often no longer attractive and appealing, either to the customers or to the authorities issuing licenses to build the house. This is the case despite the fact that this type of house can offer significant efficiency improvements. Thus, there is a need to individualize houses and at the same time use well-known solutions and methods. This is where mass customization and system deliveries become relevant for the construction industry. [10].

To achieve the goal of mass-customization, it is important to have a strong and fixed connection between the product and the business processes, including the design process. To fix and standardize such a connection, some companies have implemented a configuration system. [11]. The user of this kind of configuration system is often either a sales team or the customer. A construction project is often organized in a much more fragmented way, where the customer, designers, contractors and the supplier of the system deliveries are located in different companies. This fragmentation creates a number of new issues in relation to the implementation of configuration systems.

This article describes and evaluates four scenarios for configuration systems, which NCC can develop and offer to the market. In a larger context, the scenarios can be seen as examples of the opportunities that exist to deploy configurable system products in the construction industry.

### The case

One of the largest contractors in Denmark, NCC Construction Denmark A/S (NCC), has along with several partners, developed a prefabricated and configurable installation shaft.[12],[13]. Today, NCC supplies this prefabricated installation shaft to construction projects both inside and outside the company.

To realize the full benefit offered by the prefabricated shaft and to ensure that the construction process is ready for such a system, it is important that it is incorporated early in the design phase, preferably already when the architect designs the floor plan, especially for the bathroom and of course for the shaft. To support this incorporation, NCC wants to provide a configuration system to architects so that they know about the shaft early in the design phase. To provide easy access to the configurator, NCC wants to make it available on the Internet. Since it is often neither possible nor desirable to force the architect to use such a configurator, the configuration system should offer the architect some benefits in relation to the traditional way of designing bathrooms and shafts; it is these benefits that must motivate the architect to use the configuration system and thus provide the basis for the subsequent use of the prefabricated installation shaft.





Figure 1 The prefabricated shaft

In order to achieve its goals, which include making the configuration system attractive to architects, NCC has developed a list of wishes for the configuration system. These wishes result in a number of requirements for the configuration technology, some of which differ from what is typically seen in developing configuration systems.

The areas where the requirements differ are as follows:

- The users of the configuration system, i.e. those who produce the part of the configured product that relates to the bathroom, come from other companies than the company providing the configuration system.
- The user must not actually or emotionally experience that his creativity is being reduced.
- The part of the user community that normally uses architectural 3D CAD / BIM software expects a nice graphic user interface, where substantial parts of the interaction do not take place by entering values and selecting from drop down lists, but rather by dragging elements to the desired location.
- The solution space is very open, where only a few things are allowed or only allowed under certain conditions.
- It must be possible to transfer the configured result to the software that is being used to carry out the remaining part of the building design.

### **Problem Formulation**

A number of different examples exist of the use of configuration systems for the configuration of construction products (see [www.ikea.com](http://www.ikea.com) and [www.hth.dk](http://www.hth.dk)). Studies of the use of mass customization and product configuration in other industries – for example, the mechanics and electronics industries – show that significant benefits can be obtained in terms of faster provision, reduced errors and well-defined product families [14],[15],[16]. Also within the construction industry, the assumption is that considerable gains can be obtained by using these methods; however, the traditional way of organizing construction in Denmark creates a number of barriers against using these methods.

One of the important barriers in relation to the use of configuration systems is that many of the products in the construction industry have a large variety of dimensions, which results in an endless number of possible combinations and designs – an endless solution space. Traditional configuration systems require a fixed solution space, not only in mathematical terms but also in practically manageable terms. When such a solution space is defined, the configurations system can help the user find a legal and optimal solution in accordance with a number of constraints. Another barrier is that the building design is created independently of the producers, i.e. the material suppliers and the contractors – just those parties that in other industries traditionally describe the product families and make the configuration systems available.

In this article, we set up scenarios to show the possibilities that different technologies, with different functionality, offer in applying configuration in the design of a product with endless solution spaces, using the design of bathrooms and installation shafts as a case. The scenarios are subsequently evaluated against a number of functional user requirements, as well as an economic assessment of the benefits, costs and risks of realizing the scenarios.

## Configuration and Mass Customization

The basic idea of mass customization is to create value for the customer by adapting the product to his specific needs and by giving the customer the feeling of receiving a tailor-made product. Seen from the producer's point of view, the products are uniform production-wise and can be produced using the existing production apparatus.

In other words, the idea of customization is to develop a product program that enables the company to offer the customer a unique product that matches the individual customer's needs, while the product program provides a number of common features with respect to design, production and assembly/installation. This means that the products can be considered the same and therefore easier to produce, assemble and install.

The concept of Mass Customization [17],[18] describes a tendency in which companies that have previously manufactured mass-produced and uniform products start to manufacture these products in a continually increasing number of variants, so as better to be able to fulfill their customers' requirements.

### Method Description

Four scenarios are set up to show how the design process, as a small step towards mass customization, can be supported by configuration in whole or in part. The scenarios are created and evaluated through a four- step method, based on Action Research theory [19]. The four steps are Plan, Act, Observe and Reflect; they have not been conducted sequentially but partly parallel, in that the planning and reflection steps are combined. This is done to make sure that the four scenarios describe a wide range of technologies and to provide the opportunity to reflect on and evaluate the scenarios in relation to each other. The scenarios are normative back-casting scenarios. According to P.W.F. van Notten [20], they can be described as simple scenarios, but with two out of three features that characterize a complex scenario: multi-issue and multi-dimensional, but not multi-scale. The scenarios provide a snapshot of how the architect's design process can be supported by various configuration systems. The scenarios consist of three parts, although they are not in all cases treated separately.

- Event: What kind of a configurator is introduced?
- How will it affect the situation?
- Why? (Who gets what out of it?)

The scenarios are evaluated both technically and functionally against the established functional requirements, while also evaluating the costs and risks of realizing the scenarios described. The evaluations are carried out in accordance with the current state of configuration and CAD-/BIM-technology.

A qualitative and relative assessment of the costs of establishing the configurators has been made. This assessment is partly based on a survey collecting experiences with development and use of configuration software in 18 companies. The assessment is partly based on experience with a demo-configurator developed as part of the present project. An assessment of risk involved in using the different kinds of technology has also been made. This assessment is based on the commonly used risk definition – Risk = probability x loss – which also forms the basis of Michel Bernaroch's method [21]. Michel Bernaroch has extended the method somewhat, providing the opportunity to create a relatively detailed quantitative estimate of risk. Each of the scenarios described in this article can be realized with very different project organizations and using different software. Thus, the assessment of risk in the scenarios is based on a qualitative assessment that focuses on describing the risk factors included in Michel Bernaroch's method.

These risk factors are:

Platform volatility – will the software platform be stable or will it often change

Application experience\* – a pplication experience of the development team

Product complexity – how large and complex is the software platform

Analyst complexity – how complex is the functionality of the application

Programming-language experience\* – how much experience does the development team have with the software platform.

\* Experience is described based on existing scientific articles that describe the use of the technology in relation to the configuration. Experience is also described on the basis of whether it concerns a general technology that many vendors can work with, or is a narrow technology that very few vendors can work with; and not in relation to possible future organizations' experience with the programming language.

Each of the risk factors will, in accordance with Michel Bernaroch's methodology, be evaluated on a scale of Low, Medium or High. To obtain a uniform scheme, this scale has also been used to evaluate the other parameters. The sole exception is costs, which are set up using an index.

To find the potential benefits the configurator's ability to provide value to the company and the users (the architects), the scenarios are evaluated against a number of possible benefits. To obtain the architects' opinions about how the various scenarios support their needs and requirements, the scenarios were presented to and evaluated by four architects.

Unfortunately, some sources for this article are not in English. These include partly references dealing with Danish national building regulations, which are only available in Danish; and partly references to works by Ph.D.-students and professors at the Danish Schools of Architecture, which have a research tradition of often publishing in Danish. In spite of this, the results appear to be valid in a broader context.

#### Identification of value for the company – User's Needs and the Scenarios

The main value for the company is the ability to provide NCC with leads on potential customers and projects. To achieve this, NCC has set up a number of sub-benefits, which are formulated here as functional requirements. They are:

1. The configuration system must provide the dimensions of the shaft, so that they do not change as they do in traditional projects, when the engineer is involved in the process to making his shaft design.
2. The configuration system must ensure that the design meets the required standards and regulatory requirements – BR, SBI and DS
3. The configuration system must allow the architect to design exactly the bathroom he wants within the framework of the chosen standards and regulatory requirements.
4. The configuration system must be able to handle the main elements of the bathroom: Door, shower, washbasin and toilet.
5. It must be possible to use the result / the configuration directly in the subsequent process.
6. The configurator must be "smooth and elegant", intuitive, and must inspire the creative process.
7. The configurator must provide NCC with leads on potential customers, including information on projects where the shaft can be used.

Users are identified by analyzing the process and the roles of a typical building project in the Danish construction industry. This analysis is combined with other studies that, like projects in other industries, show that there is great freedom and need at the start of a project to make decisions, and that decisions are expensive to change later in the process.

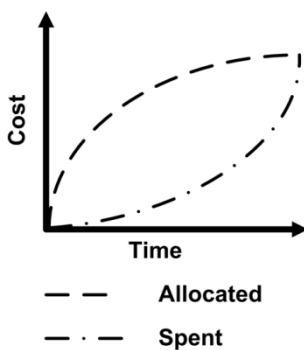


Figure 2 Cost are allocated in the early stages

The first actor the configurator can target is the architect, who in the early stages more or less makes the decisions together with the developer [22].

If, instead, the configurator were targeted the next step in the process, i.e. the engineers who design the shaft, they would have to coordinate when using the configurator with the design the architect has already made. Such coordination can cause redesign for both the engineer and the architect, just as in the present process, where we have no configuration system.

The design and construction process of today is very fragmented. The design is made by a number of engineering and architectural firms, and construction is performed by a series of head-contractors and/or subcontractors that buy their materials from a variety of suppliers. Simultaneously, the project organization gradually develops throughout the process. This creates a situation where those who make the design do not know who

will subsequently do the construction and what products they will use. Conversely, those who do the building often have very limited opportunities to influence the design to suit their preferred method and materials.

If we wish to introduce configuration systems with the current construction process and organization, it is necessary to make the configuration system available early in the process, even if those who would provide the configuration system later, or maybe never, are part of the process.

The first party in a construction project is the developer or building owner, and examples do exist where configuration systems are provided to the developer or building owner based either on a top-down approach, where the entire building is configured (e.g. [www.kern-haus.de](http://www.kern-haus.de)), or a bottom-up approach, where individual elements of the building are configured (e.g. [www.hth.dk](http://www.hth.dk)), which allows customers to configure e.g. a kitchen. These kinds of configuration systems typically target private customers who want a family house or a kitchen. Professional developers usually let an architect clarify their needs and make the detailed designs, e.g. for bathrooms. Because the NCC shaft mainly targets apartment buildings, the customers will normally be professionals who have an architect make the design.

The best way to achieve the aim of preparing a design for NCC's shaft is to use a configuration system that can incorporate it already in the early stages of the architect's design. The scenarios are based on this knowledge.

Each scenario is based on different software support, ranging from the traditional configuration software in for example ERP systems like SAP or Microsoft Axapta, or specialized configurators like Tacton Configurator or Configit Product Modeler, to 3D CAD / BIM software like Auto Desk's Revit or Graphisoft's ArchiCAD, to game technology like Adobe® Flash (see [23]), which provides another example of the development and use of graphic configuration systems.

The scenarios are created by combining the design processes and roles with the various software options available – considering software that is normally used in the construction industry and which to a greater or lesser degree is targeted configuration in general. Then the scenarios are examined to find out how they will fit into the process, and what part of the process they can support.

## Scenarios

We have identified four scenarios, each of which can be realized by using different technologies:

1. Rule configurator: based on normal programming and database technology, like SQL and .NET.
2. Archetype configurator: based on expert systems, like Tacton Configurator or Configit Product Modeler.
3. Graphic configurator: based on game technology, like Adobe® Flash.
4. CAD configurator: based on BIM technology, such as Autodesk Revit or ArchiCAD.

As part of the scenarios, we have made a functional and technical assessment.

## Rule configurator

This configuration system is used to collect and present the norms and standards to be observed when designing a bathroom. The output from this configuration system is not the bathroom design, but rather part of the foundation to be used when building the design.

In Denmark, four sets of rules and norms provide a minimum framework for how bathrooms can be arranged.

Building code BR08 (224 pages)

The Danish building code comprises a set of rules that specify the minimum acceptable level, for the funktion and technical solutions, for new houses.[24].

SBi guidelines 216 (387 pages)

“Guidelines on Building Regulations 2008, SBI instruction 216. SBI recommendations 216 on BR08 presents background and interpretations, which build bridges from the Building Regulations’ general rules for constructability solutions. Authorization includes the building code text and the same structure. Instructions have also references to standards, instructions and other background material that is further explained with concrete solutions”. [25].

SBi guidelines 222 (70 pages)

The instructions justify and recommend a series of accessibility requirements for ordinary dwellings, based on Building Regulations 2008 (BR08). The recommended goal is typically greater than regulatory requirements. The recommendations are essential for both planning and designing new buildings and for renovations and additions to the existing housing stock.[26].

Danish Standard 3028:2001 (184 pages)

The standard sets out requirements for buildings and facilities and their accessibility, which must be available to everyone, including people with disabilities.[27].

Each of these regulations provides rules for three categories of bathroom users:\_

Normal

Disabled - self-reliant

Disabled - intensive care

Within each of the three categories, each set of rules and norms has from 3-18 different rules that affect the layout of the bathroom. Some of the rules are identical and others vary across regulatory and/or user category. For the architect, this means that in order to design according to all four sets of rules/norms in all three user categories, he must deal with a total of 31 rules, of which only one subset must be followed. The rules are today described in four books, in total 865 pages.

One way a configuration system could work is by letting the user specify two things: 1) the user category and 2) what rules and standards must be followed. With this input, the configuration system can generate a list of rules for the design. Depending on the post-processing, layout and number of illustrations required, such a list will amount to about 1-3 A4 pages.

Product configuration

1 Formalities      2 Specify the elements

Bathroom

What rules and standards must be followed?

Categorie of bathrom users       General (Click to confirm)  
 Disabled - self-reliant  
 Disabled - intensive care

Building code BR08 SBI guidelines      Yes  
 No (Click to confirm)  
 Yes

Danish Standard      No (Click to confirm)  
 Yes

Figure 3 Example of rules selection

The output can be post-processed in a number of more or less intelligent ways:

- Simple extraction: Four sets of rules and norms are filtered, so the output consists only of the relevant parts from each set. No editing or coordination between the various rule/norm sets is made.
- Edited extraction: The output is filtered and redundant rules across the rule/norm sets are removed, especially between BR08 and SBI 216, since SBI 216 is an interpretation of the requirements in BR08. Also, the output include the most appropriate illustrations of the various norms and regulations.
- Analytical extraction: In addition to clearing the output of redundant requirements, the list is also interpreted so that it only shows the most demanding requirements within a given area.

The functionality of this configuration system is also integrated into the configuration systems described in the other scenarios, but the output in the other scenarios is not necessarily communicated to the user. Instead, it is used internally in the configurator, to adjust the set of regulations.

The output from the configurator consists of an extraction and reproduction of rules and norms to which the supplier of the configuration system does not have copyright. This issue must be resolved before developing such a configuration system. How to handle the copyright issue in practice is outside the scope of this research.

## **Evaluation**

### Functional

This configuration system helps the architect finding the rules he needs. Thus, the architect avoids the need to remember the rules or to look them up in up to four different books and run the risk of either finding the wrong rules or missing some of them. Thereby, the architect can reduce the time spent on making the design, but the main potential probably lies in fewer errors in the design and fewer designs rejected by the authorities, which results in a reduction in the use of both resources and calendar time. At the same time, the architect gains the opportunity to focus fully on the architectural values in the bathroom design.

In accordance with NCC's aims, this configuration provides value by creating links between NCC, which provides the configuration system, and the architect who uses it. NCC can potentially use this link to engage in dialogue with the architect to try to influence him to prepare his design for the use of NCC's shaft. This dialogue, along with concrete descriptions of how the architect ensures such preparation, lies outside this configuration system and basically consists of purely manual processes.

### Technical

The solution space within which this configuration system must work contains a finite number of solutions and is thereby a finite solution space within which the configuration system must find the relevant rules.

The input to this configuration system could be in the form of a series of choices, where the user chooses among the options offered within the rules, standards and user category via e.g. drop down menus, check marks or radio buttons.

As previously described, the result must, be edited, more or less, before it is returned to the user. Apart from the graphic part, this editing is mostly carried out according to rules that consist of mathematical/logical operations, such as: if  $a > b$  then output = a. But some rules and norms require a subjective interpretation. If they must also be interpreted before being returned to the user, the configuration system must contain a strictly logical interpretation of the rules and standard requirements.

The above requirements can be met by using ordinary programming and database technology, such as Microsoft .NET and SQL. This kind of software is apt to show its results on the internet, using for instance aspx.

### Price and risk in the development project

This configuration system contains a very limited number of rules and attributes. This, combined with the opportunity to use well known and widely used technologies, makes the risk associated with developing a configurator relatively small from a purely technical viewpoint.

The price for the development of such a configuration system is considered to be relatively low but obviously depends on the type and amount of graphics to be included in the user interface, among other factors. This assessment does not include any costs associated with the management of copyrights.

## **Archetype Configurator**

This scenario is based on a finite number of bathroom layouts, which the architect can choose among. These layouts are made by splitting the bathroom into 12 sections in which each of the four main elements (toilet, washbasin, shower and door) can be placed (see Figure 7). This gives  $12 * 11 * 10 * 9 = 11,880$  possible combinations, but not all of them are legal. Because the numbers are not explicit, the figure can be rotated without changing the solution, which provides a logical definition of the solution-space, reduced to a quarter, which gives 2970 possible solutions.

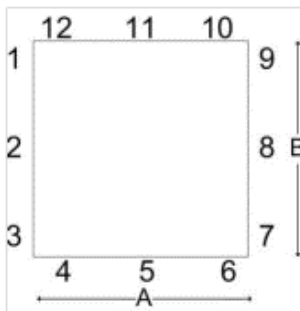


Figure 4 The 12 sections of the bathroom

In principle, the configuration can be done by showing the user a large overview of all possible combinations of the location of the bathroom components – toilet, washbasin, shower and door – with the desired variations of individual components, such as shower or tub. The architect can then choose the design he wants and thereby be sure that it is legal. The configuration system then calculates the minimum dimensions, A and B, for the desired set of rules/norms and user category. But a table with up to 2970 possible combinations, plus the desired variants, cannot make this solution work in practice. Instead, by allowing the architect to choose the location of each component separately, the architect can arrive at a solution more easily.

Example: A bathroom where the BR and DS rule/norm sets are to be fulfilled for the user category “disabled - self-reliant”. If the toilet is placed in section 2, it will be possible to place the washbasin in either sections 1, 3, 4 or 12 (see Figure 5).

Location for the toilet	<input type="text" value="2"/>	(Confirmed)
Location for the washbasin	<input type="text" value="12"/>	(Click to confirm)
Location for the door	<input type="text" value="1"/>	(Click to confirm)
Location for the bath	<input type="text" value="12"/>	(Click to confirm)

Figure 5 Place the washbasin

The configuration system is then able to calculate the minimum permissible dimensions, A and B, of the bathroom. The architect can then enlarge the bathroom to the size he wants. It is also possible to show the user a non-scaled diagram of the bathroom's decor with the selected components and their locations. Using Tacton's technology, this drawing can be developed according to the same principle as the configuration by making transparent images of the bathroom elements in their possible locations and then stacking the desired versions in order to generate an overall picture.

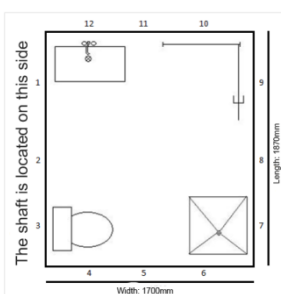


Figure 6 Overall Picture of the bathroom

After the configuration has been finished, it is also possible to send the parameters from the configuration system to a CAD program.[23]. Tacton supports this with e.g. SolidWorks, and can thereby obtain a 3D CAD model of the desired bathroom. This possibility supports the further use of the configuration, but does not support the actual configuration. This, combined with the lack of interfaces to CAD systems traditionally used in the construction industry, means that this option is not included in the scenario.

## Evaluation

### Functional

As a part of this research, a prototype configuration system of the type described here was made. The prototype was used to obtain knowledge about the possibilities and challenges of making a bathroom configurator. The research shows that this scenario does not allow the architect to

design bathrooms that meet the required rules and norms within the desired user category. But it also shows that it is a very rigid process that only interacts with difficulty with the architect's creative process, and can directly inhibit it.

Furthermore, the solution has the disadvantage that it only works with the minimum bathroom size. After the configuration, the bathroom must be extended to the desired size outside the configurator. This means that the larger the bathroom, the bigger the difference between the configured bathroom and the one actually wanted.

This type of configuration system provides the greatest value when used for minimum bathrooms, e.g. in public housing, where price and function are often the most important parameters.

The fact that the architect must change the configured design, if he does not want a minimum bathroom, means that this scenario is not able to provide the dimensions and location of the shaft.

#### Technical

The prototype shows that creating a configuration system of this type presents no significant challenge, and that it can be made with traditional configuration technology. The prototype is developed in Tacton Configurator. It is, however, a challenge to transfer the result from the configurator to the architect's CAD or BIM software. According to Tacton, the challenge, is that it cannot export to CAD file formats like IFC or dwg. These formats are normally used for the exchange of building models in the construction industry.

Tacton has an integrated web interface, which makes it possible to make the configuration system available on the Internet without having to involve further technology. The biggest technical challenge is thus to create a graphic interface that appeals to architects and supports their creative design process.

#### Price and risk in the development project

The work with the demo configuration system developed in this project shows that technically it is not a big challenge to develop a configuration system of this type. The critical risk factors are thus the classic ones – to select the right supplier and to develop the right solution.

The demo configurator contained about 230 rules and attributes, and the price of developing a professional version of such a configuration system is therefore estimated to be low.

#### Graphic Configurator

This type of configuration system works in the way that the user defines a room in either 2D or 3D, and then drags the desired elements from a library to place them inside the room. The element can be moved around in the room. When it is released by the user, the configuration system validates the placement and tells the user whether it is legal or not. If it is not legal, the configuration system indicates this, e.g. by making the element red, and/or by automatically moving the element to a legal place. Once the user has configured the bathroom, he can download a 3D CAD or BIM file that can be used as the basis for design in the architect's own BIM or CAD system.

In recent years, a number of graphic configuration systems like this have appeared. The world's largest furniture company, IKEA, and the Danish kitchen company, HTH, are examples of companies providing this kind of configuration system to their customers. Figure 7 shows a screenshot from HTH's graphic kitchen configurator on [www.hth.dk](http://www.hth.dk).

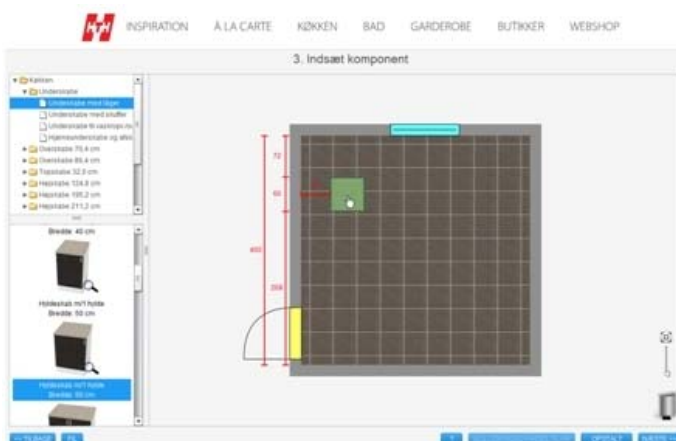


Figure 7: Graphical configurator from [www.hth.dk](http://www.hth.dk)



In spite of the large number of graphic configuration systems, it has not been possible, during the literature study for this article, to find any scientific articles describing the behavior and the underlying form of reasoning in this type of configuration system. HTH's configurator uses Adobe® Flash technology, which is also used by other configuration systems, and by many online games (see [www.onlineflashgames.org](http://www.onlineflashgames.org)).

## Evaluation

### Functional

The use of this type of configuration systems is in many ways similar to using a BIM system. It is often so simple that it can be used not only by professionals such as architects, but also by private customers without any specific professional prerequisites. Both HTH and IKEA target their configuration systems directly to their private customers.

Users of this type of configuration system can feel great freedom compared to other more choice-based configuration systems. This does not necessarily mean that they can design bathrooms that could not have been designed using the other configuration systems described in the other scenarios; however, it is done here in a flexible way that supports the creative process.

### Technical

As mentioned, the literature study for this article could not find descriptions of the technical possibilities and challenges of using the Flash technology to make graphic configuration systems. But the Flash technology is made to be used on the Internet and is therefore very suitable for this medium. Also, examples are seen of Flash-based configuration systems that can export BIM models in e.g. IFC format (see [www.dalux.dk/demo.html](http://www.dalux.dk/demo.html) and [www.goenergi.dk/boligtjek](http://www.goenergi.dk/boligtjek)).

A configuration software producer states that in their solutions, they use technologies that are also used in the gaming industry. And in our graphic, spacious and rule-based world, a number of similarities seem to exist between configuration systems and games.

### Price and risk in the development project

Flash is a widely used technology, and in connection with the research for this article, we found a large number of more or less advanced configuration systems using this technology. Such widespread use means that there are also many vendors offering solutions based on this technology, which contributes to keeping both price and risk down. But especially because the graphic user interface is relatively advanced, the price is also assessed to be relatively high. Also, as previously mentioned, it has not been possible to find scientific articles about use of the technology to develop configuration systems. This is interpreted to indicate that such an application is relatively new; therefore, the risk is assessed as relatively high.

## CAD/BIM Object Configurator

In the construction industry, which includes architects, we see an increasing use of 3D object-oriented CAD/BIM systems, such as Revit and ArchiCAD. This type of system gives the architect freedom to design what he wants within the technical framework of the system. These systems are not traditional configuration systems, but rather advanced drawing or modeling tools.

The models made in the BIM systems are not traditional CAD drawings with lines in two or three dimensions. These models are composed of parametric 3D objects representing the parts of which the building consists. Some of these objects can be perceived as small configurators, which are able to adapt the object by using a variety of input data. The objects are programmed in a language that is specific to each BIM system. For instance, objects in ArchiCAD are programmed in the language Geometric Description Language, GDL. Through their various languages, BIM systems make it possible in this way to build large or small configurable objects.[28].

Because GDL includes Cylinders, Cones, Prisms, Tubes, Surfaces and much more, you can make objects that cannot be made with wall+slab tools.

Because you can use variables like X and Y, you can make the objects change their parameters – they can be Parametric.

Because you can write IF Statements, you can make the objects obey rules – they can be Smart.

Because you can build in Repetitive Loops, you can go beyond object making – and make Tools.

Because you can rotate and move elements, you can make Mechanisms.

[29]

Because of the different languages, objects must be developed to target each of the CAD/BIM systems that NCC wants to support. This factor presses up prices for this solution; however, it also makes it possible to adapt the project size, e.g. by choosing to develop items for only one or two systems.

A number of material product suppliers in the construction industry have established object libraries, which contain models of their products (see [www.3dbyggeri.dk](http://www.3dbyggeri.dk)). By making these libraries available to architects, the products are "automatically" built into the models according to which the building will subsequently be built.

NCC can similarly establish and make a bathroom and shaft object available to architects, who can then download the object, include it in their own object library, and use it as an integral part of their own CAD systems. Thus, a guide is provided for architects for designing legal bathrooms and shafts with the right dimensions and prepared for NCC's prefabricated shaft module.

## Evaluation

### Functional

The solution has the major disadvantage of requiring the architect to have and use on his own computer one of the BIM systems for which NCC chooses to develop objects. No precise estimate is found of how many architects are using BIM software. But at present, this technology is spreading rapidly, so we do not consider this a major barrier. But it would not be possible for an architect who works e.g. in a traditional 2D CAD program to use the configurator. The fact that the solution runs on the user's own computer, in a system normally used, provides great benefits:

The user will not need to acquire experience with a new system in order to use the configurator.

Users will have the solution "at hand" as an integral part of the system they are already working with.

After the configuration is complete, the results will not have to be transferred to the user's own system.

A disadvantage of this solution is that it cannot be stored and run centrally from the provider's server. It runs on the individual user's computer. This means that the user, when using the object, must verify that it is the latest version. If the user does not make such verification, it is not certain that the relevant objects follow the latest rules and standards.

Even though the bathroom is configured directly in the BIM system and does not subsequently have to be transferred from one system to another, this does not mean that finishing is not required. For example, the angle on the floor surfaces must be defined, along with lighting, mirror and other elements that the configurator does not handle.

### Technical

Since each of the major software vendors uses its own language to develop objects, separate objects must be developed and maintained for each system. If NCC wants to make the solution available to ArchiCAD users, GDL Objects (.GDL) must be developed. Likewise, Families (.rfa) must be developed, if NCC wants to make the solution available for Revit users.

The solution is only available on the Internet insofar as the users can download the desired objects from a webpage. The subsequent configuration is done in the user's own BIM program. This makes the solution simple from NCC's point of view, since the code is not run on NCC's servers.

In their basic structure, BIM objects are not prepared to work with multiple rule sets. If NCC wants to cover all types of bathroom and all combinations of rules, it would probably be best to make an object for each combination. If all combinations are to be covered, up to 30 different objects would have to be developed and maintained.

With respect to NCC's ability to gain knowledge about potential customers and projects, this type of configurator is very unfortunate. Once the client has downloaded the object, NCC would not receive any information about when, who and for what project the configurator is used.

### Price and risk in the development project

In this solution, several factors that affect price and risk pull in opposite directions. The fact that the configuration system runs on the users' own computers means no costs to host and manage an online configuration system. The fact that objects must be developed for each of the various BIM systems that NCC wishes to support pulls in the opposite direction. Each of these systems has its own way of making objects, along with its own programming language, which means duplication of the work. It also requires that the development organization can handle all the selected technologies. Overall, the price for this solution is assessed to be in the middle.

In relation to risk, the solution is based on well-known and widely used technologies, which should keep risk down. It is also based on technologies that cannot be controlled, however, and the risk exist that they can be changed and NCC be forced to make updates at times over which it has no control.

## Evaluation of the Scenarios

The four scenarios are assessed with respect to fulfillment of NCC's functional requirements, as well as in relation to cost and risk. Cost is stated as an index based solely on development cost. Scenario 2, for which we have made a demo configuration system, is set to index 100.

	Scenario 1 Rule configurator	Scenario 2 Archetypes	Scenario 3 Graphic	Scenario 4 BIM/CAD
Functional requirements				
Provide shaft dimensions	Low	Low	Low	High
Control of regulatory requirements	High	Medium	High	High
Freedom in design	Low	Low	High	High
Handling of the bathroom key elements	Low	Medium	High	High
Ability to transfer results	Low	Low	Low	High
Smooth, elegant and intuitive user interface	High	Medium	High	High
Leads to NCC	Medium	High	High	Low
Risk				
Platform volatility	Low	Low	Medium	High
Application experience	High	Low	High	Medium
Product complexity	Low	Low	Medium	High
Analyst complexity	Low	Low	High	High
Programming-language experience	High	High	Low	Medium
Development cost				
Development cost index	38	100	223	169

Tabel 1

The table shows that among the four scenarios, the most benefits are obtained by realizing scenario 3. Scenario 4 is good when measured on the value to architects, but loses on the possibility to generate leads for NCC. We have not scored the various requirements, but the lack of leads is so critical that this scenario cannot be realized with success. Scenario 3 is relatively the most expensive scenario to realize, and it is associated with high risk. But because the Flash technology is widespread, it must be possible to clarify this risk very early in the project process and thereby deal with it.

In the less productive end, we find scenarios 1 and 2. Scenario 2 has the most gains of the two, but it also results in a quite locked design process that can discourage architects from using the configurator. At worst, it could create a bad atmosphere in the construction industry in relation to the use of configuration in general.

## Conclusion and Perspectives

All four scenarios describe a situation in which the current design process has not been fundamentally changed. It is still the architect who makes the layout of the bathroom, without specific knowledge of how the bathroom and shaft will find its final design and be produced, or by whom. Only the actual design process is modified, and only this process is directly supported by the configuration system. The scenarios indicate that to start with a good and varied range of opportunities exist for using configuration systems in the construction industry. They also show that it can be done without fundamentally changing the present process.

They also indicate, however, that the overall setup – where the configuration system is provided by a party, which enters the process much later, or maybe never, creates problems. One of the big challenges is that the architect should be attracted to use the configurator rather than remain with his current process. It is not enough that the configuration system is an advantage for the overall construction process. It must also be so for the architect. This makes great demands on the configurator, both in terms of function, user interface and solution space. The configurator must not exclude solutions that the architect wants, even when these solutions are a disadvantage when it is evaluated that in relation to the total building process much of the potential is lost. Whether this means that the construction processes and basic organization need to be changed in order to make it practicable and profitable to develop configuration systems is beyond the scope this article to assess.

## Sources

- [1] U. Harlov, *Developing product families based on architectures*, Denmark: Department of Mechanical Engineering, Technical University of Denmark. (2006)
- [2] N.H. Mortensen, L. Hvam, P. Boelskifte, C. Lindschou, S. Frobenius, A. Haug, "Making product customization profitable", *International journal of industrial engineering : Theory applications and practice*, vol. 17, pp. 25-35, 2010.
- [3] C. Thuesen, L. Hvam, "Efficient on-site construction: learning points from a German platform for housing", *Construction innovation: Information, Process, Management*, Vol. 11, pp. 338-355, 2011.
- [4] L. Hvam, "The Rulers Factory — a tool for learning product modeling techniques", *Computers and industrial engineering*, vol. 35, pp. 29-32. 1998.
- [5] A. Joneja, N. K.S. Nevilli, "Automated configuration of parametric feeding tools for mass customization", *Computers and industrial engineering*, vol. 35, pp. 463-466, 1998.
- [6] V.B. Kreng, T. Lee, "Modular product design with grouping genetic algorithm-a case study", *Computers and industrial engineering*, vol. 46, pp. 443-460. 2004.
- [7] J. Jiao, M.M. Tseng, M. Mitchell, V.G. Vincent, F. Lin, "Product family modeling for mass customization", *Computers and industrial engineering*, vol. 35, pp. 495-498. 1998.
- [8] F. Salvador, P.M. De Holan, F. Piller, "Cracking the code of mass customization", *MIT sloan management review*, vol. 50, pp. 71. 2009.
- [9] L. Hvam, N. H. Mortensen, J. Riis, "Product Customization", Berlin Heidelberg: Springer, 2008.
- [10] D. Benros, J.P. Duarte, "An integrated system for providing mass customized housing", *Automation in construction*, vol. 18, pp. 310-320, 2009.
- [11] Q. Yanhong, W. Guangxing, "Product configuration based on modular product family modeling", *Journal of Computational Information Systems*, vol 6, no. 7, pp. 2321-2331, 2010.
- [12] Byggeriets Innovation. (2008). På vej mod fremtidens skakt, Byggeriets Innovation, Copenhagen. [Online]. Available: <http://www.ncc.dk/skakt> (in Danish).
- [13] C. Thuesen, L. Hvam, "Rethinking the Business Model in Construction by the Use of Off-Site-“System Deliverance” - The Shaft Project", *Journal of Architectural Engineering*, No Issue Number, 2012.
- [14] L. Hvam, "Mass customization in the electronics industry - based on modular products and product configuration", *Journal of Mass Customization*, vol. 1, pp. 410-426, 2006.
- [15] C. Forza, F. Salvador, "Managing for variety in the order acquisition and fulfillment process: The contribution of product configuration systems", *International journal of Production Economics*, vol. 76, pp. 87–98, 2002.
- [16] M. M. Tseng, J. Jiao, "Case-based evolutionary design for mass customization", *Computers & Industrial Engineering*, vol. 33, p. 319, 1997.

- [17] J. Pine, "Mass Customization – The New Frontiers in Business Competition", Boston: Harvard Business School Press, 1999.
- [18] M. M. Tseng, F. T. Piller, "The Customer Centric Enterprise", Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2003.
- [19] R. O'Brien. (2012, Aug.), "An Overview of the Methodological Approach for Action Research". Faculty of Information Studies, University of Toronto, [Online] <http://www.web.ca/robrien/papers/arfinal.html>.
- [20] P.W.F. Notten, J. Rotmans, M.B.A. van, Asselt, D. S. Rothman, "An updated scenario typology", *Futures*, vol. 35, pp. 423–443. 2003
- [21] M. Benaroch, Appari, A. "Financial pricing of software development risk factors", *IEEE Software* September/ October, pp. 65-73, 2010.
- [22] FRI, PLR, Danske ARK. (2012, Aug.), "Description of services for Building and planning 2009". [Online] <http://www.danskeark.dk/Medlemservice/Raadgiverjura/Aftalegrundlag/Ydelsesbeskrivelser/Byggeri-og-planlaegning.aspx>
- [23] L. Hvam, K. Ladeby, "An approach for the development of visual configuration systems", *Computers & Industrial Engineering*, vol. 53, pp. 401–419, 2007.
- [24] Byggecentrum, "Building Regulations 2008", Byggecentrum, Ballerup, 2008.
- [25] SBI Guidelines 216, *SBI Guidelines 216*, Copenhagen: SBI Aalborg University, 2008.
- [26] L. Sigbrand, H. P. Jensen, "Tilgængelige boliger", Copenhagen: Statens Byggeforskningsinstitut, 2008 (in Danish).
- [27] Dansk Standard, "DS 3028:2001 - Tilgængelighed for Alle", Copenhagen: Dansk Standard, 2001 (in Danish).
- [28] K. Agger, D. Kjølner, N. Knudsen, P. Kortegaard, J. Skauge, J., "Produktkonfigurering i byggeriet", Aarhus: Aarhus School of Architecture, 2004. (in Danish)
- [29] D. Nicholson-Cole, "The GDL Cookbook Version 3", Nottinham: Marmalade Graphics, 2001

# Resumé

Anvendelse af konfigurerbare systemleverancer, baseret på principperne om Mass Customization, er fra flere sider beskrevet som en løsning på byggeriets udfordringer med lav indtjening, manglende produktivitetsudvikling og svigtende kvalitet. Danmarks Tekniske Universitet (DTU), Arkitektskolen Aarhus (aarch) og Center for Industriel Arkitektur CINARK på Det Kongelige Danske Kunstakademis Skoler for Arkitektur, Design og Konservering – Arkitektskolen – har en central rolle i etableringen af en vision om anvendelse af systemleverancer i byggeriet. Herfra er der udgivet en række publikationer, der beskriver hvilke muligheder, der ligger i at overføre Mass Customization, produktplatforme og brug af konfigureringsystemer, -teorier og -metoder, der er udviklet i produktionsindustrien, til byggerier.

Med dette som udgangspunkt er der i dette projekt gennemført en række arbejder, der med en ingeniørmæssig fokus og forskningsmæssig tilgang, undersøger mulighederne for at realisere visionen. Arbejderne fokuserer på en række udvalgte områder inden for det overordnede forskningsspørgsmål:

”Hvordan kan Mass Customization og de underliggende teorier, i en dansk kontekst, realisere visionen om industrialiseret arkitektur, med anvendelse af systemleverancer?”

Et vigtigt element i Mass Customization og etablering og anvendelse af produkt familier er modularisering. Moduler i byggeri leder de flestes tanker hen på perioden med modul- og montagebyggeri. En periode, hvor der skete en stor industrialisering af byggeriet, men hvor der også blev opført meget store enheder af meget standardiseret byggeri, en byggeritype, der ikke længere er et marked for i Danmark. For at udvide forståelsen af moduler i byggeri er der gennemført en undersøgelse af historisk byggeri efter, Bygningslov for Staden København og dens Forstæder. Her viser det sig, at det historiske byggeri med moderne metoder kan beskrives som bestående af moduler med standardiserede grænseflader. Og at disse grænseflader ikke bare er gældende imellem de fysiske moduler, men går igen i forhold til både organisering, materialer og processer.

Byggerier er meget store produkter, der sælges i et begrænset styktal, helt ned til ét styk. Samtidig udføres byggerierne af virksomheder med en begrænset størrelse og udviklingskapacitet. Dette betyder, at langt de fleste virksomheder må arbejde med en trinvis implementering af moduler. Mulighederne for at implementere moduler trinvist er beskrevet i en række arbejder, hvor der arbejdes med henholdsvis en top-down tilgang med udgangspunkt i hele bygningen, og en bottom-up tilgang, hvor der fokuseres på enkeltdele.

Den trinvis implementering foranlediger også en delvis modularisering, noget som den bagvedliggende Mass Customization og modulariseringsteori kun fokuserer meget begrænset på. For at skabe en forståelsesramme omkring delvis modularisering er der i dette arbejde skabt ”The Module Application Matrix”, der giver mulighed for at mappe helt eller delvist modulariserede produkter med helt eller delvist detaljerede moduler.

Et andet centralt element i Mass Customization teorien og i visionen er brugen af konfigureringsystemer. Der er her etableret tre forskellige prototype konfigurationssystemer, der skal belyse mulighederne for at anvende konfigureringsystemer i byggeriet – herunder også de muligheder og udfordringer, der ligger i at konfigurere delvist modulariserede og delvist beskrevne produkter og produkter med uendeligt løsningsrum.