

Aalborg Universitet - School of Engineering and Science Bygge- og Anlægskonstruktion, 10. semester Sohngårdsholmsvej 57, 9000 Aalborg Telefon 9940 8530 www.bsn.aau.dk

Synopsis:

Dette afgangsprojekt omhandler betons elasticitetsmodul, der er en vigtig mekanisk egenskab, som f.eks. benyttes til at bestemme deformationen af strukturelle elementer. Der findes flere matematisk udtryk i gældende standarder, der udtrykker betons elasticitetsmodul som funktion af trykstyrken; i Danmark EC 2 inkl. DK NA. I dette projekt er det gennem et eksperimentelt studium undersøgt, hvordan betons elasticitetsmodul og trykstyrke påvirkes af volumenandelen af tilslag, tilslagsmaterialets styrke, vand/cement-forhold samt indhold af puzzolaner. Baseret på de eksperimentelle resultater er forholdet mellem elasticitetsmodul og trykstyrke evalueret. Endvidere er det undersøgt, om udtrykkene i EC 2 og det tilhørende DK NA giver et godt estimat af traditionel dansk betons elasticitetsmodul. Derudover vurderes andre modeller til estimering af elasticitetsmodul - herunder kompositmodeller og empiriske modeller. Det er fundet, at betons trykstyrke primært afhænger af cementpastaens styrke og sekundært af tilslagets form og ruhed, mens betons elasticitetsmodul primært afhænger af det grove tilslags elasticitetsmodul og sekundært af cementpastaens elasticitetsmodul. Der kan ikke umiddelbart siges at være en entydig sammenhæng mellem betonernes trykstyrke og elasticitetsmodul, hvorfor estimeringen via standarderne ikke er særlig god. Derudover fremstår kompositmodellerne alt for komplicerede at benytte i praksis. I stedet er det fundet, at en empirisk model, der tager højde for trykstyrken, densiteten, indholdet af puzzolaner og typen af grove tilslagsmaterialer, estimerer betons elasticitetsmodul ganske godt.

Rapportens indhold er frit tilgængeligt, men offentliggørelse (med kildeangivelse) må kun ske efter aftale med forfatterne.

 \mathbf{T} itel:

Betons Elasticitetsmodul og Trykstyrke

$\mathbf{T}ema:$

Afgangsprojekt

Projektperiode: Forår 2011

 \mathbf{F} orfatter:

Henriette Wøhlk-Poulsen

Vejleder:

Eigil Verner Sørensen

 \mathbf{O} plagstal: 3

Sidetal: 78

Sidetal i appendiks: 39

 ${\bf A} {\rm fsluttet}$ den 9. juni 2011

Summary

The modulus of elasticity, E, is an important mechanical property of concrete, determining e.g. deflections of structural elements like beams and slabs, and the load carrying capacity of columns. The modulus of elasticity is defined in the region in which Hooke's law is valid for the material as the ratio of stress over strain. In mechanics, Hooke's law of elasticity is an estimation that states that the amount of strain is linearly related to the stress. This can be determined from the slope of a stress-strain curve created during compression test on a sample of concrete. In a typical stress-strain diagram of concrete the vertex is characterized as the compressive strength, f_c . The slope of the chord connecting the origo of the coordinate system to one third of the compressive strength determines the secant modulus of elasticity, which in this thesis is referred to as the modulus of elasticity.

Despite its importance, the modulus of elasticity is not usually measured on site for compliance purposes. It is often estimated from the measured compressive strength based on the empirical relationships proposed by various codes of practice or in other current literature. This is mainly to avoid performing laborious and time-consuming direct measurements from stress-strain curves. In the codes valid in Europe and Denmark (Eurocode 2 and the Danish national annex to Eurocode 2) such mathematical expressions are present. Besides the expressions in the codes, theoretical approaches can be applied to evaluate the modulus of elasticity. In the theoretical models, concrete is assumed to be a multi-phase material. Thus, the modulus of elasticity is obtained as a function of the elastic behavior of its components. This is possible by modeling the concrete as a two-phase material, involving the aggregates and the cement paste, or three-phase material, if the so-called transition zone between the two phases is introduced.

In this thesis an experimental parametric study is carried out to determine how the modulus of elasticity and the compressive strength are influenced by the volume fraction and type of the aggregate, the water to cement ratio, w/c, and by the presence of puzzolans. In the experimental study seven different mixes of concrete, made by the author, are used to test the compressive strength and the modulus of elasticity at 2, 7, and 28 days maturity. Additionally three mixes, made by Unicon A/S, are tested at 1, 2, 3, 7, 28, and 56 days. The seven mixes made by the author consist of a reference mix (with a medium volume fraction of aggregate, which is sea gravel, and a medium w/c-ratio), and two mixes with a lower and higher volume fraction of aggregate, and two mixes with other type of aggregate (crushed granite and bauxite), and two mixes with a higher and lower w/c-ratio. The three mixes made by Unicon A/S consist of three mixes with nearly the same composition; the difference between the mixes is, that one is made without puzzolans, one is made with fly ash, and one is made with fly ash and microsilica.

Based on the experimental results, the relationship between the modulus of elasticity and the compressive strength is evaluated for the tested concrete. Furthermore, it is investigated if the mathematical expressions in Eurocode 2 and the appurtenant Danish national annex predict the modulus of elasticity well. Likewise five composite models and a practical empirical model are assessed.

Through the experimental study it is found that the final modulus of elasticity is reached earlier than the final compressive strength. This is due to the fact, that the compressive strength is primarily influensed by the properties of the cement paste, which depend on the age and the composition. Contrary, the modulus of elasticity is mainly influenced by the properties of the aggregate. From the experimental study it can be summarized that:

- 1. The volume fraction of aggregate have nearly no effect on the compressive strength and a limited effect on the modulus of elasticity. A 20% increase of the volume fraction of aggregate leads to approximately 10% higher modulus of elasticity after 28 days.
- 2. The type of aggregate has a significant influence on both the compressive strength and the modulus of elasticity. The shape and roughness of the aggregate have crucial influence on the compressive strength; rough and edged surface give higher strength. The modulus of elasticity of the aggregate itself is critical for the modulus of elasticity of the concrete.
- 3. The w/c-ratio influences the compressive strength and the modulus of elasticity most significantly the compressive strength. Low w/c-ratio gives higher compressive strength and modulus of elasticity.
- 4. The content of microsilica has a strong influence on the compressive strength; after 28 days the compressive strength is approximately 25% higher for the concrete containing microsilica compared to the concrete without microsilica. The content of microsilica has no noteworthy influence on the modulus of elasticity.

It is found from the experimental study that there is no consistent correlation between the compressive strength and the modulus of elasticity. The mathematical expressions in Eurocode 2 and the appurtenant Danish national annex are not found to predict the modulus of elasticity of the tested concrete mixes with an acceptable accuracy. It is found that there is a tendency to overestimate the modulus of elasticity with the expression in Eurocode 2, and with the expression in the Danish national annex to Eurocode 2 the opposite is the case. Therefore it cannot from this experimental study be recommended to predict the modulus of elasticity from the expression in Eurocode 2. The composite models investigated have a physical reality. Nevertheless, the composite models appear too complicated for a practical purpose, because the elastic modulus of concrete is a function of several parameters; the modulus of elasticity of all the phases, and the volume fraction of aggregate. As a consequence, such models can only be used to evaluate the effects produced by the concrete components on the modulus of elasticity. It is found that a practical model proposed by (Takafumi et al., 2008) predicts the modulus of elasticity well, as the compressive strength, density, content of puzzolans and type of coarse aggregate is taken into account.

Forord

Dette afgangsprojekt er udarbejdet på civilingeniøruddannelsens 10. semester foråret 2011 ved Aalborg Universitet under studieretningen Bygge- & Anlægskonstruktion. Rapporten tager udgangspunkt i faget betonteknologi og har titlen "Betons Elasticitetsmodul og Trykstyrke".

Rapporten består af en hovedrapport med tilhørende appendiks og en vedlagt cd-rom. Der vil løbende gennem rapporten blive refereret til de nævnte materialer som dokumentation for beregninger m.m. Referencer til filerne på cd-rommen er skrevet i kursiv dvs. *(filnavn.type)*.

Anvendte kilder i hovedrapporten er angivet som *(forfatter, årstal)* med mulighed for reference til et specifikt afsnit, en side, en figur mm. efter årstallet. Yderligere information om de anvendte kilder kan findes bagrst i rapporten under kapitlet "Litteratur", hvor kilderne er sorteret alfabetisk efter forfatterens efternavn.

Ved figurer og tabeller er der anført kilder, medmindre de er udarbejdet af forfatteren selv.

Projektet er gennemført i samarbejde med Unicon A/S. Unicon A/S har leveret en del af de betoncylindre, der er testet i forsøgene. Der rettes en særlig tak til produktingeniør Jørgen Schou. Derudover har Aalborg Portland A/S og Densit A/S leveret nogle af delmaterialerne til fremstilling af betonen, hvilket der rettes en tak for.

Desuden rettes en tak til vejleder Eigil Verner Sørensen samt ingeniørassistenterne Lars Poulsen og Jan Laursen for godt samarbejde.

Indhold

Sy	nboler	ix
1	Indledning	1
2	Problemanalyse 2.1 Elasticitetsmodulets variation 2.2 Standardernes beskrivelse 2.3 Problemformulering 2.4 Problemafgrænsning	3 3 5 7 8
3	Mekaniske egenskaber 3.1 Trykstyrke 3.2 Elasticitetsmodul	9 10 13
4	Beregningsmodeller	19
5	Betontyper og recepter 5 5.1 Valg af betontyper 5 5.2 Materialer 5 5.3 Proportionering 5 5.4 Recepter 5	25 25 27 28 29
6	Forsøgsprocedure 5.1 Blanding af beton 5.2 Prøvning af frisk beton 5.2 6.2.1 Sætmål 6.2.2 Luftindhold 6.2.3 Densitet 6.2.4 Resultater af prøvning af frisk beton 5.3 Udstøbning og lagring af prøvelegemer 5.4 Prøvning af hærdet beton 6.4.1 Densitet 6.4.3 Elasticitetsmodul	31 32 33 33 34 34 35 36 36 36 36 37
7	Forsøgsresultater: Trykstyrke 4 7.1 Indflydelse af tilslagsvolumen 4 7.2 Indflydelse af tilslagsstyrken 4	41 41 44

	 7.3 Indflydelse af v/c-forhold	46 47 49
8	Forsøgsresultater: Elasticitetsmodul 8.1 Indflydelse af tilslagsvolumen 8.2 Indflydelse af tilslagsstyrke 8.3 Indflydelse af v/c-forhold 8.4 Indflydelse af puzzolaner 8.5 Opsummering	51 53 55 57 58
9	Effekt af prøvelegemers størrelse	59
10	Vurdering af forsøgsresultater	63
11	Konklusion	75
I	Appendiks	79
Α	Bauxits densitet og absorption	81
В	Kalibrering af trykprøvemaskine	83
С	Prøvningsmetode	87
D	Statistisk behandling af forsøgsresultater	89
\mathbf{E}	Forsøgsresultater: Trykstyrke	91
\mathbf{F}	Forsøgsresultater: Elasticitetsmodul	103
G	Egenskabsudvikling 1	115
Lit	itteratur 110	

Symboler

Symboler, der benyttes i rapporten, er vist i den følgende liste. Når symbolerne benyttes første gang i rapporten, vil de blive beskrevet.

1-n	er cement pastaens volumen andel af betonen $\rm [m^3/m^3]$
a	er luftindholdet i betonen [%]
A	er absorption af tilslaget[%]
ao	er det naturligt luftindhold [%]
С	er cementindholdet $[kg/m^3]$
COV	er variationskoefficienten [%]
E	er betonens elasticitetsmodul [GPa]
E _{0k}	er det karakteristiske begyndelseselasticitetsmodul [GPa]
E_{Bache}	er betonens elasticitetsmodulet bestemt via Bache og
	Nepper-Christensen model [GPa]
Ecm	er middel sekantelasticitetsmodulet [GPa]
E_{Counto}	er betonens elasticitetsmodulet bestemt via Counto model [GPa]
E_{Hirsch}	er betonens elasticitetsmodulet bestemt via Hirsch model [GPa]
Ep	er cementpastaens elasticitetsmodul [GPa]
E_{Reuss}	er betonens elasticitetsmodulet bestemt via Reuss model [GPa]
Et	er tilslagets elasticitetsmodul [GPa]
E_{Voigt}	er betonens elasticitetsmodulet bestemt via Voigt model [GPa]
f _c	er betonens trykstyrke [MPa]
$f_{c,\mathrm{ave}}$	er den gennemsnitlige trykstyrke af de testede betoner [MPa]
f _{ck}	er den karakteristiske trykstyrke [MPa]
$f_{c,\emptyset100\times200}$	er betonens trykstyrke målt på Ø100 $\times 200$ cylindre [MPa]
$f_{c,\emptyset150\times300}$	er betonens trykstyrke målt på Ø150×300 cylindre [MPa]
$F_{\mathrm{målt}}$	er den målte trykkraft [kN]
F_{sand}	er den sande trykkraft [kN]
F_{vist}	er den viste trykkraft [kN]
G	er forskydningsmodulet [MPa]
k	er Bolomeys konstant, der afhænger er cementtype og termin [-]
k _p	er aktivitetsfaktoren for puzzolanet [-]
К	er kompressibilitetsmodulet [MPa]
L	er det naturlige luftindhold $[m^3/m^3]$

m _{akt}	er massen af aktuel prøve [g]
m _d	er massen af tør prøve [g]
\mathfrak{m}_{ssd}	er massen af vandmættet, overfladetør prøve [g]
m _{vand}	er massen af prøve nedsænket i vand [g]
М	er modenhed [døgn]
n	er tilslagets volumenandel [-]
Р	er puzzolanindhold $[kg/m^3]$
S	er spredningen (f _c [MPa] eller E [GPa])
$S_{\rm sand}$	er sandindholdet $[kg/m^3]$
S_{sten}	er stenindholdet $[kg/m^3]$
V	er vandbehovet $[kg/m^3]$
v/c	er forholdet mellem vand og cement [-]
$(\nu/c)_{pprox k u}$	er det ækvivalente forhold mellem vand og cement [-]
\overline{X}	er middelværdien (f _c [MPa] eller E [GPa])
y	er den betragte de egenskab (f $_{\rm c}$ [MPa] eller E [GPa])
yo	er egenskaben ved $M = exp(1) \cdot \tau_0$ [døgn]
y_∞	er den opnåelig egenskab, såfremt hærdetiden går mod u endelig (f $_{\rm c}$ [MPa] eller E [GPa])
α	er en konstant, der afhænger er cementtype og termin [-]
α_e	er krumningsparameteren [-]
γ	er betonens densitet $[kg/m^3]$
$\gamma_{ m ave}$	er den gennemsnitlige densitet af de testede betoner $[kg/m^3]$
ε	er tøjning [mm/mm]
ρ_c	er cementens densitet $[kg/m^3]$
ρ_{ν}	er vandets densitet $[kg/m^3]$
$\rho_{\rm sand}$	er sandets densitet $[kg/m^3]$
$\rho_{\rm sten}$	er stenens densitet $[kg/m^3]$
σ	er spænding [MPa]
τ_0	er modenheden, hvor egenskabsudviklingen synligt ekspander e $\left[\mathrm{d} \phi \mathrm{gn}\right]$
τ_e	er en karakteristisk tidskonstant [døgn]

Kapitel 1

Indledning

Beton i den forstand, som den kendes og anvendes den i dag, har ikke en særlig lang historie bag sig. Den begyndte sin udvikling i forbindelse med industrialiseringen i slutningen af det nittende århundrede og har været i fortsat udvikling siden da især betinget af muligheder for industriel fremstilling af cement. Kunsten at fremstille cementlignende bindemidler kan imidlertid dateres længere tilbage i tiden; f.eks. anvendte egypterne brændt gips ved bygning af pyramiderne (2600-1600 f.kr.), og romerne anvendte brændt kalk tilsat vulkansk aske ved bygning af Pantheon-kuplen (ca. 120 e.kr.). (Herholdt et al., 1985)

Den fortsatte udvikling af beton har ført til, at beton i dag er det mest anvendte konstruktionsmateriale indenfor byggeriet. Dette skyldes, at beton er karakteriseret ved en høj trykstyrke og en god holdbarhed, der kan sammenlignes med natursten. Beton udsat for vind og vejr vil forvitre, men er betonen sammensat under hensyntagen til den konkrete påvirknings art og styrke, vil forvitringsprocessen forløbe så langsomt, at den ikke har nogen større indflydelse ved konstruktioners normale levetid, forudsat at særligt aggressive væsker og luftarter ikke kommer i kontakt med betonen.

Idet beton er et hyppigt anvendt konstruktionsmateriale, er det vigtigt at have kendskab til betonens deformationsegenskaber. Et konstruktionselement af beton vil konstant undergå dimensionsændringer på grundlag af en af de følgende påvirkninger (Herholdt et al., 1985):

- 1. Lastændringer
- 2. Fugtændringer
- 3. Temperaturændringer
- 4. Fysisk-kemiske reaktioner

Ved dimensionering af konstruktionselementer må der tages hensyn til alle påvirkningerne, men der fokuseres normalt på dimensionsændringerne ved lastændringer. Til at beskrive dette fænomen benyttes betonens elasticitetsmodul, E, der er en vigtig mekanisk egenskab af beton, når f.eks. deformationen af de strukturelle elementer som bjælker og plader og bæreevne af søjler skal fastlægges. Elasticitetsmodulet er i henhold til Hookes lov defineret som forholdet mellem spænding, σ , og tøjning, ε ; dvs. $\sigma = E \cdot \varepsilon$. Standarder til design af beton konstruktioner, f.eks. Eurocode 2 og tidligere DS 411, indeholder matematiske udtryk, som beskriver betonens elasticitetsmodul som funktion af dens trykstyrke, f_c . Dog findes der ingen universelt gældende korrelation, der er i stand til at forudsige elasticitetsmodulet ud fra trykstyrken alene, da andre parametre også vil have indflydelse på både udviklingen og størrelsen af elasticitetsmodulet. Ligeledes kan det vises, at udtrykkene i standarderne i væsentlig grad overestimerer elasticitetsmodulet – estimationsformlerne er dermed ikke konservative, hvilket forventes af en standard.

Grundlæggende kan beton betragtes som et kompositmateriale bestående af flere separate faser. Derfor kan forskellige kompositmodeller (f.eks. parallel eller seriel) etableres til at forudsige elasticitetsmodulet, der afhænger af forskellige parametre f.eks. betonsammensætningen og delmaterialernes egenskaber.

Kapitel 2

Problemanalyse

I dette kapitel beskrives forskellige parametre af betonsammensætningen, der har indflydelse på elasticitetsmodulet. Derudover skildres sammenhængen mellem betonens trykstyrke og elasticitetsmodul i henhold til europæisk standard (Eurocode 2) samt gældende standard i Danmark (det danske nationale anneks til Eurocode 2). Denne relation benyttes, når elasticitetsmodulet ikke bestemmes eksperimentelt. Disse afsnit vil munde ud i en problemformulering, der vil danne grundlag for rapporten.

2.1 Elasticitetsmodulets variation

Som beskrevet i kapitel 1 estimeres elasticitetsmodulet ofte med udgangspunkt i trykstyrken, men andre parametre vil også have indflydelse på størrelsen og udviklingen af elasticitetsmodulet. I det følgende gennemgås effekten af nogle af de forskellige parametre. Størstedelen af parametrene beskriver betonsammensætningens indflydelse på elasticitetsmodulet. (Herholdt et al., 1985), (Nepper-Christensen, 1970)

v/c-forhold

Forholdet mellem vand og cement har principielt samme indflydelse på betonens elasticitetsmodul som på trykstyrken - elasticitetsmodulet aftager ved stigende v/c-forhold, da porøsiteten af betonen stiger, idet porøsiteten af cementpastaen især afhænger af blandingsforholdet mellem vand og cement. Effekten af variationen af v/c-forhold på elasticitetsmodulet er ret beskedent og langt mindre end på betonens trykstyrke specielt på de senere hærdningsstadier. Grunden hertil findes i betonens to komponenter (cementpasta og tilslagsmateriale); styrken er afhængig af den svageste komponent (oftest cementpastaen), mens elasticitetsmodulet er afhængigt af begge komponenters elasticitetsmodul, da betonens komponenter ikke har samme deformationsegenskaber.

Volumenandel

Både cementpastaens og tilslagsmaterialets elasticitetsmodul influerer på elasticitetsmodulets størrelse i forhold til deres relative volumenandel. Da cementpastaen her et lavere elasticitetsmodul end tilslaget og som regel kun udgør 20-35 volumenprocent af betonen, får selv relativt store variationer i cementpastaens elasticitetsmodul en relativt beskeden indflydelse på betonens elasticitetsmodul.

Alder

Elasticitetsmodulet vokser med alderen på principielt samme måde som styrken pga. den med tiden tiltagende hærdning af cementpastaen. Når betonen er ung (1-3 døgn), er elasticitetsmodulet af cementpastaen meget mindre end elasticitetsmodulet af tilslagsmaterialet. I takt med at betonen hærder, vil elasticitetsmodulet af cementpastaen vokse, hvilket resulterer i en stigning i betonens elasticitetsmodul. Elasticitetsmodulet vil dog nå sin slutværdi (i hvert fald fra et praktisk synspunkt) hurtigere end styrken - nemlig efter ca. 90 døgn, hvor elasticitetsmodulet af cementpastaen vil være så stort, at en fortsat stigning ikke vil influere markant på betonens elasticitetsmodul. Det faktum, at betonens elasticitetsmodul og trykstyrken vokser i forskellig takt, betyder, at betonens trykarbejdskurve ændrer form i takt med at betonen ældes.

Konsistens

Den friske betons konsistens har i sig selv ingen indflydelse på den hærdnede betons elasticitetsmodul, men da konsistensen afhænger af betonens blandingsforhold (specielt vanddoseringen), vil en konsistensændring også medføre en mindre ændring af elasticitetsmodulet. Jo mere vand der tilsættes, desto større vil volumenandel af cementpastaen blive, og dermed vil elasticitetsmodulet af den hærdnede beton blive lavere. Denne effekt er dog ret beskeden. Det er dog ikke kun vanddoseringen, der har indflydelse på konsistensen af den friske beton; samspillet mellem cementen og de anvendte plastificerende tilsætningsstoffer har især betydning for de reologiske egenskaber. Ved anvendelse af plastificeringsstoffer kan betonens vandbehov reduceres, og dermed kan højere styrker opnås, uden at bearbejdeligheden forringes. Anvendelse af plastificeringsstof har dog ikke nogen indflydelse på størrelsen af elasticitetsmodulet.

Luftindhold

Luftindblanding i betonen medfører, at der sker en forøgelse af cementpastaens porøsitet, hvorved cementpastaens og dermed også betonens elasticitetsmodul aftager. Som udgangspunkt kan der regnes med, at betonens elasticitetsmodul aftager med 2 % for hver procent luft, der indblandes.

Cementtype

Cementtypen har kun beskeden indflydelse på elasticitetsmodulet, så længe det drejer sig om Portlandcement. Efter en periode på 14 døgn vil elasticitetsmodulet være stort set uafhængigt af hvilken type cement, der er anvendt. Der kan dog ved de tidlige terminer forventes en vis afhængighed af cementtypen.

Tilslagsmateriale

Som udgangspunkt har det relativt stor effekt på størrelsen af elasticitetsmodulet hvilken type tilslag, der anvendes. Hvis der anvendes tætte, hårde materialer (kvarts, flint, granit) vil elasticitetsmodulet være mærkbart højere, end hvis der anvendes traditionelle danske tilslagsmaterialer (sø- og bakkemateriale). Grunden til dette er, at de danske tilslagsmaterialer som regel indeholder en større eller mindre mængde bløde, porøse partikler, der har en formindskende virkning på gruspartiklernes gennemsnitlige elasticitetsmodul og derved en reducerende effekt på betonens elasticitetsmodul. Som en grov tommelfingerregel kan der regnes med, at for hver vægtprocent tilslagsmaterialerne indeholder bløde, porøse partikler, reduceres betonens elasticitetsmodul med 1 %. Denne regel gælder for op til næsten 40 % porøst materiale i tilslaget.

Betonens densitet

Som tidligere nævnt afhænger betonens elasticitetsmodul af tilslagsmaterialets elasticitetsmodul. Tilslagsmaterialets elasticitetsmodul aftager ved aftagende densitet af materialet. Dette kan der tages hensyn til, idet betonens densitet er betydeligt influeret af tilslagsmaterialets densitet. Det er især ved anvendelse af lette tilslagsmaterialer (f.eks. letklinker), der optræder stor variation i betonens densitet og dermed elasticitetsmodul.

Temperatur

Ved aftagende temperatur stiger elasticitetsmodulet. Det har dog kun en beskeden indflydelse ved små temperatursvingninger.

Sammenfatning

Afrundingsvis kan det med udgangspunkt i denne litteratur
undersøgelse siges, at slutværdien af betons statiske elasticitetsmodul afhænger af tilslagsmaterialets elastiske
egenskaber og dets volumenandel. v/c-forholdet og cement
typen har kun betydning for den hastighed, hvormed slutværdien nås.

2.2 Standardernes beskrivelse af elasticitetsmodul

Som det fremgår af afsnit 2.1, er der flere parametre af betonsammensætningen, der har indflydelse på elasticitetsmodulet, og derved er der ikke en entydig sammenhæng mellem trykstyrke og elasticitetsmodul. Dette kan visuelt illustreres gennem grafen vist i figur 2.1. Grafen er en afbildning af elasticitetsmodul som funktion af trykstyrken målt på terninger. Grafen er fremstillet af den schweiziske forsker Roš (1937) og går under betegnelsen Rošes bisværm. (Herholdt et al., 1985)



Figur 2.1 – Sammenhæng mellem betons elasticitetsmodul og trykstyrke målt på terninger - kaldet Rošes bisværm. (Herholdt et al., 1985, fig. 3.2-21)

Såfremt elasticitetsmodulet ikke er bestemt eksperimentelt, estimeres det som funktion af trykstyrken på trods af, at det er en kendsgerning, at elasticitetsmodulet ikke er entydigt afhængigt af trykstyrken. Praktisk anvendes oftest den i standarden angivne sammenhæng - i Eurocode 2 er sammenhængen givet ved udtrykket i formel 2.1 (DS/EN 1992-1-1, 2008).

$$E_{cm} = 22 \cdot \left(\frac{f_{ck}}{10}\right)^{0,3} \tag{2.1}$$

hvor

 E_{cm} er middel sekantelasticitetsmodulet [GPa] f_{ck} er den karakteristiske trykstyrke [MPa]

Definitionen af både trykstyrken og sekantelasticitetsmodulet kan ses i kapitel 3.

I det danske nationale anneks til Eurocode 2, er det i Danmark tidligere gældende estimat fra DS 411 adopteret. Elasticitetsmodulet estimeres her ud fra udtrykket i formel 2.2 (EN 1992-1-1 DK NA, 2007).

$$E_{0k} = 51 \cdot \frac{f_{ck}}{f_{ck} + 13} E_{cm} = 0, 7 \cdot E_{0k}$$
(2.2)

hvor

E_{0k} er det karakteristiske begyndelseselasticitetsmodul [GPa]

Definitionen af begyndelseselasticitetsmodulet kan ligeledes ses i kapitel 3.

Graferne for forskrifterne givet i formel 2.1 og 2.2 er vist i figur 2.2. Udover forskrifterne er der vist nogle målinger foretaget eksperimentelt af elasticitetsmodul og trykstyrke i andre studier, jf. (Kristensen and Skúlason, 2006) og (Johansen and Høgh, 2007).

Af figuren ses det, at estimatet af elasticitetsmodulet ifølge det danske nationale anneks er mere konservativt end estimatet ifølge Eurocode 2, men alligevel overestimeres elasticitetsmodulet i nogle tilfælde.



Figur 2.2 – Elasticitetsmodul som funktion af trykstyrke ifølge Eurocode 2 og DK NA til Eurocode 2 samt målinger foretaget eksperimentielt.

2.3 Problemformulering

Formålet med projektet er at undersøge, hvordan betons elasticitetsmodul og trykstyrke influeres af volumenandelen af tilslag, tilslagsmaterialets styrke, vand/cement-forholdet samt indhold af puzzolaner. Derudover er formålet at evaluere forholdet mellem elasticitetsmodulet og trykstyrken, samt at vurdere forskellige modeller, både teoretiske og praktiske, til estimering af elasticitetsmodulet. Dette gøres gennem teoretiske overvejelser og eksperimentelle undersøgelser.

2.4 Problemafgrænsning

Der arbejdes i projektet udelukkende med det statiske elasticitetsmodul - altså betragtes det dynamiske elasticitetsmodul ikke.

Da det vurderes at være umuligt, pga. tidsmæssige begrænsninger, at undersøge alle betonsammensætningerne, der kan have indflydelse på størrelsen af elasticitetsmodulet, varieres der på nogle få udvalgte parametre i betonsammensætningen, der vurderes at have betydelig indflydelse på elasticitetsmodulet. Parametrene, der varieres på, er volumenandelen af tilslag, type af tilslagsmateriale, forholdet mellem vand og cement (v/c), puzzolanindhold samt alderen. Dermed ses der bort fra at beskæftige sig videre med konsistensens, luftindholdets, cementtypens, densitetens og temperaturens indflydelse på elasticitetsmodulet.

Kapitel 3

Mekaniske egenskaber

Gennem projektet undersøges betons trykstyrke og elasticitetsmodul - nogle af betonens grundlæggende mekaniske egenskaber. Derfor beskrives disse to egenskaber i dette kapitel. I afsnit 3.1 beskrives trykstyrken. Ofte betragtes trykstyrken som værende betonens vigtigste egenskab ved dimensionering, idet en af betons vigtigste egenskaber er dens gode evne til at optage trykbelastninger. I afsnittet redegøres der for parametrene, der har indflydelse på betons trykstyrke.

I afsnit 3.2 anskues elasticitetsmodulet. I afsnittet beskrives, hvordan elasticitetsmodulet er defineret, der redegøres ligeledes som for trykstyrken for de parametre, der har størst indflydelse på betonens elasticitetsmodul.

Til at illustrere disse mekaniske egenskaber anvendes en grafisk fremstilling - en såkaldt arbejdslinie. En arbejdslinie viser sammenhængen mellem kraftpåvirkningen og den tilsvarende deformation. Betons principielle trykarbejdslinie er vist i figur 3.1, hvor normalspændingen, σ , er vist som funktion af tøjningen, ε .



Figur 3.1 – Illustration af betons trykarbejdslinie.

Af figur 3.1 fremgår det, at arbejdslinien krummer i hele dens forløb pga. udviklingen af mikrorevner omkring tilslagspartiklerne. Mikrorevnerne opstår, idet spændingerne vil koncentreres i cementpastaen omkring tilslagspartiklerne, når beton belastes. Herved øges tøjningen, og det resulterer altså i en krum arbejdslinie. Tangenthældningen er størst i begyndelsen og aftagende i resten af dens forløb. Denne arbejdslinie vil danne grundlag for definitionen af betons trykstyrke og elasticitetsmodul i de følgende afsnit. (Herholdt et al., 1985)

3.1 Trykstyrke

Trykstyrken er defineret som den største opnåelige spænding i betonen. På figur 3.1 er trykstyrken, f_c , angivet som toppunktet af arbejdslinien, idet linien krummer.

I det følgende vil de væsentligste parametre, der benyttes til beskrivelse af betonsammensætningen, blive gennemgået med henblik på deres indflydelse på trykstyrken. Af disse parametre kan v/c-forhold, luftindhold, puzzolanindhold samt tilslagsmaterialets art og kornstørrelsesfordeling nævnes. Desuden vil fremstillingsteknikken have indflydelse på trykstyrken, og hærdningsgraden vil ligeledes have indflydelse på styrkeniveauet.

Såfremt beton betragtes som et to fase materiale (opbygget af cementpasta og tilslag) kan det fastslås, at det hovedsageligt er cementpastaens styrke, der er afgørende for betonens styrke. Normalt er det gældende, at tilslagspartiklernes styrke er væsentligt større end cementpastaens, og derfor deltager tilslagspartiklerne kun i begrænset omfang af bruddet.

Såvel som for alle andre materialer er det gældende, at styrken falder ved tiltagende porøsitet. Dette er illustreret på figur 3.2, hvor den relative styrke er afbildet som funktion af porøsiteten. (Herholdt et al., 1985)



Figur 3.2 – Grafisk afbildning af Ryskwitchs formel $f/f_0 = e^{-7p}$.

Cementpastaens porøsitet er særlig afhængig af blandingsforholdet mellem vand og cement, hvorfor der gennem tiden er opstillet forskellige empiriske udtryk, der beskriver sammenhængen mellem betonens trykstyrke og v/c-forhold; f.eks. Bolomeys formel givet i formel 3.1 (Herholdt et al., 1985, s. 137).

$$f_c = k \cdot \left(\frac{1}{\nu/c} - \alpha\right), \text{ for } 0,45 < \nu/c < 1,25$$
 (3.1)

hvor

- f_c er trykstyrken [MPa]
- k er Bolomeys konstant, der afhænger er cementtype og termin [-]
- ν/c er forholdet mellem vand og cement [-]
- α er en konstant, der afhænger er cementtype og termin [-]

For Bolomeys formel forudsættes det, at betonen kun har et naturligt luftindhold, der ikke overstiger 1,5-2,0 %. Betonens styrke som funktion af v/c-forholdet beregnet via Bolomeys formel er illustreret på figur 3.3, hvor et naturligt luftindhold på 1,5 % er forudsat. Desuden er det forudsat, at der benyttes Rapid cement og terminen er 28 døgn, hvilket medfører konstanterne k = 30 og $\alpha = 0, 5$.



Figur 3.3 – Betons 28-døgns trykstyrke som funktion af v/c-forhold beregnet via Bolomeys formel for beton med naturligt luftindhold og Rapid cement.

Det vil aldrig kunne undgås, at der findes en del naturligt luft i betonen, men hvis komprimering ikke stemmer overens med betonens konsistens, vil der blive indfanget unødigt meget luft, der vil reducere styrken utilsigtet. I nogle betoner indblandes dog bevidst luft ved tilsætning af luftindblandingsmiddel primært for at opnå et materiale, der er frostbestandigt, og sekundært for at opnå et materiale med bedre bearbejdelighed. Dette medfører en reduktion i styrken, hvilket der ligeledes tages hensyn til i de førnævnte empiriske udtryk. Dette gør sig bl.a. gældende for Bolomeys korrigerede formel, som baserer sig på erfaringer, der viser, at betonens styrke nedsættes med 4 % for hvert luftprocent, der indblandes. Bolomeys korrigerede formel er givet ved formel 3.2 (Herholdt et al., 1985, s. 140).

$$f_c = k \cdot \left(\frac{1}{\nu/c} - \alpha\right) \cdot (1 - 0, 04(a - a_0)), \text{ for } 0, 45 < \nu/c < 1, 25$$
 (3.2)

hvor

a er luftindholdet [%]

 a_0 er det naturligt luftindhold [%]

Betonens 28-døgns trykstyrke som funktion af v/c-forholdet beregnet via Bolomeys korrigerede formel er illustreret på figur 3.3 for en beton, hvor der er antaget et luftindhold på 6 %. Desuden er det forudsat, at der benyttes Rapid cement, hvilket medfører Bolomeys konstant k = 30. Trykstyrken er ligeledes vist for en tilsvarende beton blot med et naturligt luftindhold på 1,5 %. Der er altså indblandet yderligere 4,5 % luft, hvilket gør, at styrken reduceres med 18 % (= 4, 4 \cdot 4).



Figur 3.4 – Betons 28-døgns trykstyrke som funktion af v/c-forhold beregnet via Bolomeys (korrigerede) formel for beton med naturligt luftindhold samt beton med et luftindhold på 6%. Ved begge er det antaget, at der er benyttet Rapid cement.

I projektet anvendes der i nogle blandinger luftindblandingsmiddel, derudover anvendes også puzzolaner (flyveaske og mikrosilica) i nogle udvalgte blandinger. Puzzolanernes indflydelse på styrken tages i regning i form af en aktivitetsfaktor, k_p . Denne faktor angiver forholdet mellem puzzolanens styrkebidrag og tilsvarende mængde cements styrkebidrag. Dvs. hvis P betegner puzzolanindholdet (målt i kg/m³) vil $k_p \cdot P$ være den cementmængde, som puzzolanet kan erstatte. Til at tage højde for denne indflydelse indføres der i Bolomeys formel et ækvivalent v/c-forhold, se formel 3.3 (Herholdt et al., 1985, s. 140).

$$f_{c} = k \cdot \left(\frac{1}{(\nu/c)_{\varpi k\nu}} - \alpha\right) \cdot (1 - 0, 04(a - a_{0})), \quad \text{hvor} \quad (\nu/c)_{\varpi k\nu} = \frac{\nu}{c + k_{p} \cdot P}$$
(3.3)

hvor

3.2 Elasticitetsmodul

Som nævnt indledningsvis er elasticitetsmodulet i forbindelse med indførelsen af Hookes lov defineret som forholdet mellem spænding, σ , og tøjning, ε - dvs. $\sigma = E \cdot \varepsilon$. Da betons arbejdslinie er krum, som vist i figur 3.1, er elasticitetsmodulet afhængig af spændingsniveauet, eftersom modulet aftager med voksende spænding. Derudover er betonens deformationer tidsafhængige, derfor er der forskel på, om elasticitetsmodulet bestemmes ud fra de totale eller de elastiske deformationer. Af denne grund kan elasticitetsmodulet angives som tangenthældningen, $E = d\sigma/d\varepsilon$, eller som sekanthældningen, $E^* = \sigma/\varepsilon$. Forskellige hældninger er illustreret på figur 3.5. De forskellige elasticitetsmoduler er alle nogle, der anvendes, men til forskellige formål. Det er hyppigst brugt at angive sekantværdien - det er også den, der bestemmes eksperimentelt senere i forbindelse med det eksperimentelle studium (svarende til en tredjedel af trykstyrken), jf. afsnit 6.4.3. (Herholdt et al., 1985)



Figur 3.5 – Definition af de forskellige elasticitetsmoduler bestemt som hældningen af linierne.

Det er vanskeligt at opstille en model til beregning af elasticitetsmodulet, da beton er et materiale, der udgøres af flere komponenter med forskellige stivhed. Betonerne, der betragtes i projektet, består af komponenterne cementpasta, tilslag samt overgangszone mellem tilslag og cementpasta (samt evt. luft). Modsat beregningsmodeller for trykstyrken, hvor kun den svageste komponent (cementpastaen) indgår, vil alle komponenterne have indflydelse på elasticitetsmodulet.

I afsnit 2.1 blev der redegjort for betonsammensætningens indflydelse på elasticitetsmodulet. Det er her beskrevet, at slutværdien af betons elasticitetsmodul hovedsageligt afhænger af tilslagsmaterialets elastiske egenskaber og dets volumenandel. Derudover nævnes det, at v/c-forholdet og cementtypen kun har betydning for den hastighed, hvormed slutværdien nås. Dette er illustreret for varierende v/c-forhold i figur 3.6.



Figur 3.6 – Betons elasticitetsmodul (sekantværdi svarende til $\sigma = 0, 3 \cdot f_c$) som funktion af alder for forskellige v/c-forhold. Gunstige hærdningsforhold og gode, hårde sand- og stenpartikler er forudsat. (Herholdt et al., 1985, fig. 3.2-20)

Som det er illustreret på figur 3.6 vokser elasticitetsmodulet, når cementpastaen hærder, men indflydelsen af hærdningen er størst ved en tidlig alder. Efter ca. 90 modenhedsdøgn er betonens elasticitetsmodul stort set uafhængig af v/c-forholdet og antager en værdi på ca. 40 GPa under forudsætning af gunstige hærdningsforhold samt gode hårde sand- og stenpartikler. (Herholdt et al., 1985)

Betonens elasticitetsmodul afhænger altså kun i mindre grad af v/c-forholdet, end hvad der var gældende for trykstyrken. Dette skyldes, at elasticitetsmodulet afhænger af flere komponenter, mens trykstyrken kun afhænger af den svageste komponents egenskaber.

Selvom det er kendt, at betons elasticitetsmodul er afhængig af alle komponenterne nævnt tidligere, kan elasticitetsmodulet estimeres ved anvendelse af simple analytiske modeller, hvor betonen betragtes som et to-fase materiale – reduceret til komponenterne cementpasta og tilslag. Via disse modeller betragtes sammenhængen mellem betonens elasticitetsmodul og cementpastaens og tilslagets egenskaber.

Ved denne simple betragtning kan der regnes med to grænsetilfælde, hvor der antages:

- 1. Samme spænding i cementpasta og tilslag (hvilket haves ved stift tilslag i en slap cementpasta).
- 2. Samme tøjning i cementpasta og tilslag (hvilket haves ved slapt tilslag i en stiv cementpasta).



Figur 3.7 – Tv. (tilfælde 1) Model for beton med stift tilslag i slap cementpasta (Herholdt et al., 1985, fig. 3.2-16). Th. (tilfælde 2) Model for beton med slapt tilslag i stiv cementpasta (Herholdt et al., 1985, fig. 3.2-17).

I det første tilfælde antages spændingen at være den samme i cementpastaen som i tilslaget - altså antages de to faser at være koblet serielt, se figur 3.7 (tv.). Denne model kaldes Reuss model. Elasticitetsmodulet beregnes via udtrykket givet i formel 3.4 (Herholdt et al., 1985, s. 71).

$$\frac{1}{E} = \frac{1-n}{E_p} + \frac{n}{E_t} \quad \text{for} \quad E_p < E_t \tag{3.4}$$

hvor

- n er tilslagets volumenandel [-]
- E_p er cementpastaens elasticitetsmodul [GPa]
- E_t er tilslagets elasticitetsmodul [GPa]

Anvendelse af modellen i formel 3.4 forudsætter samme spændingstilstand i cementpastaen og tilslagspartiklerne, hvilket betyder, at tilslagspartiklerne skal have et elasticitetsmodul, der er højere end cementpastaens. Dette antages at gøre sig gældende for de betoner, der anvendes i det eksperimentelle studium, se afsnit 5.1.

Betragtes det andet tilfælde antages tøjningen at være den samme i cementpastaen som i tilslaget - altså antages det, at de to faser er koblet parallelt, se figur 3.7 (th.). Denne model kaldes Voigt model. I dette tilfælde beregnes elasticitetsmodulet via udtrykket givet i formel 3.5 (Herholdt et al., 1985, s. 71).

$$\mathbf{E} = (1 - \mathbf{n}) \cdot \mathbf{E}_{\mathbf{p}} + \mathbf{n} \cdot \mathbf{E}_{\mathbf{t}} \quad \text{for} \quad \mathbf{E}_{\mathbf{p}} > \mathbf{E}_{\mathbf{t}} \tag{3.5}$$

Disse simple modeller har dog den ulempe, at de kræver kendskab til elasticitetsmodulet af cementpastaen og tilslaget, hvilket sjældent haves. Modellerne kan i stedet illustrere de to komponenters indflydelse på betonens elasticitetsmodul. Dette er gjort på figur 3.8, hvor de to grænsetilfælde i formel 3.4 og 3.5 er benyttet til at vise forskellige værdier af cementpastaens elasticitetsmodul i forhold til tilslagets elasticitetsmodul.



Figur 3.8 – Betons relative elasticitetsmodul som funktion af tilslaget volumenandel. (Herholdt et al., 1985, fig. 3.2-18).

Figur 3.8 giver overblik over den forventelige størrelse af elasticitetsmodulet afhængig af stivheden og tilslagets volumenandel. Størrelsen af granits elasticitetsmodul vil ligge i omegnen af 45 GPa (Herholdt et al., 1985, tab. 9.2), og søstens elasticitetsmodul vil formentligt ikke afvige meget fra dette. Cementpastaens elasticitetsmodul kan variere meget - men vil i mange tilfælde være 10 - 20 GPa afhængig af betontype (Kristensen and Skúlason, 2006). Med udgangspunkt i disse forudsætninger vil $E_t/E = 0, 3 - 0, 4$.

Der findes udover disse to beregningsmodeller flere modeller, der på samme måde afhænger af de to fasers elasticitetsmodul. I tabel 3.1 er der samlet nogle forskellige modeller.

Voigt model	$E_{\rm Voigt} = (1 - n) \cdot E_p + n \cdot E_t$
Reuss model	$\frac{1}{E_{\text{Reuss}}} = \frac{1-n}{E_p} + \frac{n}{E_t}$
Hirsch model	$\frac{1}{E_{\rm Hirsch}} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{E_{\rm Voigt}} + \frac{1}{E_{\rm Reuss}} \right)$
Counto model	$\frac{1}{E_{\rm Counto}} = \frac{1 - \sqrt{n}}{E_{\rm p}} + \left(\frac{1 - \sqrt{n}}{\sqrt{n}} \cdot E_{\rm p} + E_{\rm t}\right)^{-1}$
Bache og Nepper-Christensen model	$E_{\mathrm{Bache}} = E_t^n \cdot E_p^{1-n}$

Tabel 3.1 – Modeller til beregning af elasticitetsmodul. (Baalbaki et al., 1992)

I tabel 3.1 er der udover de to tidligere nævnte modeller tre andre; Hirsh model er en kombination af Voigt og Reuss model, mens Counto model er en mere realistisk model, der antager perfekt bonding mellem tilslagspartikler og cementpasta. Til sidst i tabellen er Bache og Nepper-Christensen model vist; denne model er baseret på en model af samme navn til beskrivelse af trykstyrken. Modsat de andre modeller har denne model ikke nogen fysisk mening, men den svarer til et geometrisk gennemsnit af de to fasers deformationer. (Baalbaki et al., 1992), (Zhou et al., 1995)

Fælles for alle disse modeller er, at de som nævnt tidligere tager udgangspunkt i, at betonen betragtes som et to-fase materiale. Men som beskrevet indledningsvis i dette afsnit vil flere komponenter have indflydelse på størrelse af elasticitetsmodulet, når en beregningsmodel opstilles. Overgangszonen mellem cementpasta og tilslag har også indflydelse på betonens elasticitetsmodul, da denne zone har en anden mikrostruktur end den resterende cementpasta. Den anderledes mikrostruktur består i, at i overgangszonen (zonen mellem cementpastaen og tilslagspartiklerne) er det ikke muligt for cementpartiklerne at pakke sig lige så tæt som i resten af pastaen, se figur 3.9.



Figur 3.9 – Skematisk illustration af overgangszone med vægeffekt op mod en tilslagspartikel. (SFA, 2011)

Overgangszonen kan dog mindskes ved tilsætning af mikrosilica, da disse partikler er betydeligt mindre end cementpartiklerne og dermed har bedre pakning omkring tilslagspartiklerne. I overgangszonen vil v/c-forholdet være højere end i resten af cementpastaen, hvilket vil medføre lavere styrke. (Herholdt et al., 1985)

I kapitel 4 er der foretaget et litteraturstudium af flere forskellige beregningsmodeller af elasticitetsmodul som funktion af trykstyrken. I dette litteraturstudium vil der både betragtes modeller, der antager beton som et to-fase materiale og som et tre-fase materiale. Kapitel 4

Litteraturstudium: "Beregningsmodeller"

I dette afsnit beskrives nogle få udvalgte studier, der beskæftiger sig med at estimere betons elasticitetsmodul ud fra trykstyrke ved at betragte eksperimentelle studier under hensyntagen til betonens sammensætning. Der findes et utal af studier foretaget over en lang årrække, der beskæftiger sig med dette emne. Tendensen, i de betragtede studier, er, at beton i de ældste studier betragtes som et to-fase materiale, som beskrevet i afsnit 3.2, men i de nyeste studier betragtes beton ofte som et tre-fase materiale.

I (Lydon and Balendran, 1986) undersøges indflydelsen af typen af tilslag, trykstyrken, densiteten, alderen og hærdningshistorien på betonens elasticitetsmodul. Dette er gjort via et eksperimentelt studium, hvor en lang række betontypers (letvægt såvel som normalvægt) elasticitetsmodul er testet i både træk og tryk efter 3, 7 og 28 døgn. Alle betonerne er opbevaret i vand det første døgn, og derefter er de opbevaret i enten vand med en temperatur på $19\pm1^{\circ}\mathrm{C}$, luft med en relativ fugtighed på 75 ± 5 % eller luft med en relativ fugtighed på 30 ± 5 % indtil testudførelsen .

Via dette studium er det fundet, at den relative fugtighed, betonen udsættes for under hærdning, har stor indflydelse på elasticitetsmodulet. Det er fundet, at letvægts beton når sin endelig værdi af elasticitetsmodul før normalvægts beton, men på senere stadier har opbevaringen større indflydelse end på normalvægts beton. Det er ligeledes fundet, at elasticitetsmodulet bestemt ved tryk svarer til det bestemt ved træk.

Desuden er det fundet, at en to-fase beregningsmodellen foreslået af Bache og Nepper-Christensen, se tabel 3.1, fungerer godt i forhold til de testede betoner. Dette er imidlertid en kompositmodel, der er vanskelig at anvende i praksis, da der kræves kendskab til tilslagsmaterialets og cementpastaens elasticitetsmodul, hvilket der sjældent haves. Derfor er der i studiet også givet en empirisk model, der afhænger af trykstyrke og densitet, se formel 4.1 (Lydon and Balendran, 1986).

$$E = \gamma^2 \cdot f_c^{0,5} \cdot 10^{-6}$$
 (4.1)

hvor

- E er betonens elasticitetsmodul [GPa]
- γ er betonens densitet [kg/m³]
- f_c er betonens trykstyrke [MPa]

Studiet har altså vist, at betonens densitet samt trykstyrke er af afgørende betydning for betonens elasticitetsmodul. Dette understreges også i (Kockal and Ozturan, 2010), der er et studium af trykstyrke og elasticitetsmodul af let konstruktionsbeton. I studiet testes forskellige letvægts betoner med forskellige tilslagsmaterialer, og målinger af trykstyrke og elasticitetsmodul evalueres i forhold til beregningsmodeller fra to standarder: ACI 318 Building Code (formel 4.2) og BS 8110 (formel 4.3) (Kockal and Ozturan, 2010).

$$\mathsf{E} = \gamma^{1,5} \cdot 0,043 \cdot \mathsf{f}_c^{0,5} \cdot 10^{-6} \tag{4.2}$$

$$E = \gamma^2 \cdot 0,0017 \cdot f_c^{0,33} \cdot 10^{-6}$$
(4.3)

De eksperimentelle resultater i dette studium viser, at disse standarders beregningsmodeller er udmærkede. Ligeledes vises det, at densiteten af den testede beton er af afgørende betydning for elasticitetsmodulet. Tungere betoner (blandt letvægts betonerne) resulterede i en stærkere beton, når volumenandelen af tilslag blev bibeholdt i betonblandingerne. Grunden til dette forklares ved, at densiteten af betonen er relateret til densiteten af tilslagsmaterialet, der kan relateres til betonens elasticitetsmodul. Densiteten af betonen og af tilslagsmaterialerne er nemmere at måle end elasticitetsmodulet, derfor er det mere praktisk, at beregningsmodellerne afhænger af densiteten og ikke elasticitetsmodulet som beskrevet i afsnit 3.2.

Beregningsmodellerne beskrevet tidligere tager udgangspunkt i normalstyrkebeton, men i takt med at højstyrkebeton er blevet mere og mere udbredt gennem de sidste årtier, er det også blevet mere eftertragtet at kunne bestemme elasticitetsmodulet uden at skulle gøre det eksperimentelt. Derfor er der gennem flere studier undersøgt, om beregningsmodellerne, der har vist sig at give gode resultater for normalstyrkebeton, kan anvendes for højstyrkebeton. Både (Baalbaki et al., 1992) og (Zhou et al., 1995) beskæftiger sig med denne problemstilling. I begge studier er der foretaget eksperimentelle undersøgelser, som minder om hinanden; der er støbt og testet en række betoner med det samme v/c-forhold, den samme volumenandel af cementpasta og forskellige tilslagsmateriale.

Gennem studierne har det vist sig at være usikkert at forudsige elasticitetsmodulet ud fra trykstyrken for højstyrkebeton via de beregningsmodeller, der er beskrevet tidligere i afsnit 2.2, i afsnit 3.2 og i dette afsnit.

Kompositmodellerne beskrevet tidligere er som bekendt baseret på en betragtning af beton som et to-fase materiale. Men eftersom modellerne generelt har vist sig ikke at være gældende i alle tilfælde, er det naturligt at stille spørgsmålstegn ved, om det er en god antagelse at betragte beton som et to-fase materiale. I afsnit 3.2 er denne overvejelse indledningsvis taget op. Ud over de to faser (camentpastaen og tilslaget) har en tredje fase (overgangszonen mellem cementpastaen og tilslaget) en indflydelse på elasticitetsmodulet.

Indflydelsen fra overgangszonen på parametre som f.eks. styrken, porøsitet og brudmønster er veldokumenteret, men indflydelsen på elasticitetsmodulet er knapt så veldefineret. Det er kendt, at afstanden mellem tilslagspartikler er 75-100 μ m, og at overgangszonen har en tykkelse på ca. 50 μ m, derfor må en stor del af den hydratiserede cementpasta være be-

liggende indenfor overgangszonen (Nilsen and Monterio, 1992). I overgangszonen er der en porøsitetsgradient, der er stigende, når tilslagspartiklerne nærmes, hvilket er forbundet med højere v/c-forhold og dermed lavere styrke. I betoner med mikrosilica vil overgangszonen kun være 8-10 μ m, hvorfor overgangszonen må have en mere begrænset indflydelse på elasticitetsmodulet end i betoner, hvor der ikke er tilsat mikrosilica.

I (Nilsen and Monterio, 1992) undersøges det netop, om det er acceptabelt at betragte beton som et to-fase materiale. Dette gøres ved at sammenligne elasticitetsmoduler, der er bestemt eksperimentelt for en række betoner, med en øvre og nedre værdi bestemt ved en beregningsmodel kaldet Hashin-Shtrikman model, se formel 4.4 (Nilsen and Monterio, 1992).

$$\mathsf{E}_{\mathrm{nedre}} = \frac{9 \cdot \mathsf{K}_{\mathrm{nedre}} \cdot \mathsf{G}_{\mathrm{nedre}}}{3 \cdot \mathsf{K}_{\mathrm{nedre}} + \mathsf{G}_{\mathrm{nedre}}} < \mathsf{E} < \mathsf{E}_{\phi \mathrm{vre}} = \frac{9 \cdot \mathsf{K}_{\phi \mathrm{vre}} \cdot \mathsf{G}_{\phi \mathrm{vre}}}{3 \cdot \mathsf{K}_{\phi \mathrm{vre}} + \mathsf{G}_{\phi \mathrm{vre}}}$$
(4.4)

hvor

K er kompressibilitetsmodulet [MPa]

G er forskydningsmodulet [MPa]

Såfremt de målte værdier ligger indenfor intervallet, vil modellen accepteres, men hvis værdierne ikke gør, vil det ifølge studiet være et tegn på, at beton ikke kan betragtes som et to-fase materiale, men at overgangszonen er nødvendig at tage med i betragtningen, når elasticitetsmodulet bestemmes. Betonerne, der er testet i studiet, er med varierende tilslagsmateriale og varierende pastavolumen.

I studiet er det fundet, at de målte elasticitetsmoduler stort set alle sammen ligger uden for grænserne opstillet via Hashin-Shtrikman modellen. Derfor kan det ifølge studiet ikke retfærdiggøres at betragte beton som et to-fase materiale; en tredje fase skal inkluderes.

For at komme ud over at betragte beton som et to- eller tre-fase materiale, er der i flere studier fremstillet praktiske formler til beregning af elasticitetsmodul; dette er tilfældet i (Takafumi et al., 2008). Andre studier, der er nævnt i dette afsnit, baserer sig alle på eksperimentelle studier af elasticitetsmodul og trykstyrke af et begrænset antal betonblandinger, hvor der er lagt vægt på en bestemt type beton; letvægtsbeton, højstyrkebeton etc. Således indgår der i studierne ikke alle de eksperimentelle data, der er tilgængelige. Men i (Takafumi et al., 2008) er der forsøgt at råde bod på dette; i studiet er der indsamlet 3000 datasæt fremstillet af mange forskellige forskere, der har brugt forskellige materialer. Disse data er analyseret statistisk og brugt til at fremstille en universel formel, som kan anvendes i praksis til at bestemme elasticitetsmodulet. Denne formel tager højde for hvilken type tilslagsmateriale og puzzolaner, der er brugt.

Til fremstilling af den universelle formel er der i studiet valgt en generel form, som formlen skal have. Den generelle form er vist i formel 4.5, der kan minde lidt om den, der er givet i Eurocode 2, se formel 2.1.

Til at bestemme konstanterne i udtrykket er dataene behandlet statistisk, og konstanterne er bestemt én for én i følgende rækkefølge: b, c, α , k_1 og k_2 . Det endelige udtryk er vist i formel 4.6 (Takafumi et al., 2008, formel 8a).

$$E = k_1 \cdot k_2 \cdot 3,35 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{f_c}{60}\right)^{1/3} \cdot \left(\frac{\gamma}{2400}\right)^2$$
(4.6)

hvor

b	er en exponent, der tager højde for trykstyrken [-]
с	er en exponent, der tager højde for densiteten [-]
α	er en konstant, der tager højde for valg af b og $c \ [-]$
k1	er en korrektionsfaktor, der tager højde for tilslagsmaterialet [-]
k ₂	er en korrektionsfaktor, der tager højde for puzzolaner [-]
γ	er betonens densitet $[kg/m^3]$
γ_{ave}	er den gennemsnitlige densitet af de teste de betoner $\rm [kg/m^3]$
f _c	er betonens trykstyrke [MPa]
$f_{c,ave}$	er den gennemsnitlige trykstyrke af de testede betoner [MPa]

I formel 4.6 er korrektionsfaktorerne, k_1 og k_2 , ikke givet direkte, da disse er generelle, men afhængig af henholdsvis hvilken type tilslag og hvilken type puzzolaner, der er anvendt. Korrektionsfaktorerne kan ses i tabel 4.1.

Type af grove tilslag	k ₁
Knust kalksten, bauxit	1,20
Knust granit, andesit, basalt, lerskifer, brosten	$0,\!95$
Andre grove tilslag	1,00
Type af puzzolan	k ₂
Mikrosilica, højovnsslagge, flyveaske fume	0,95
Flyveaske	1,10

Ud fra dette litteraturstudium tyder det på, at beton ikke generelt kan betragtes som et tofase materiale. I flere tilfælde virker det mest som et sammentræf, hvis beregningsmodellerne stemmer overens med de eksperimentelle målinger, men beregningsmodellerne siger generelt noget om størrelsesordnen på elasticitetsmodulet. Derudover kan det konkluderes, at det ser ud til, at betons elasticitetsmodul:

- 1. er direkte proportional med kubikroden af trykstyrken,
- 2. er direkte proportional med kvadratet af densiteten og

3. afhænger af hvilken type tilslagsmateriale og hvilken type samt mængde puzzolaner, der anvendes.

Dette litteraturstudium tyder altså ikke på, at der er en direkte sammenhæng mellem elasticitetsmodulet og tilslagets volumenandel, som det ellers var forventet.
Kapitel 5

Betontyper og recepter

For at underbygge og undersøge den teori, der er beskrevet tidligere, er det valgt at foretage et eksperimentelt studium, hvor elasticitetsmodulet og trykstyrken måles for en række betoner. I dette kapitel beskrives hvilke betontyper, der arbejdes med gennem projektet. Valget af betontyperne og proportioneringen af disse foretages med baggrund i kapitel 3, hvor det er nærmere beskrevet hvilke parametre, der har indflydelse på størrelsen og udviklingen af elasticitetsmodulet.

5.1 Valg af betontyper

I projektet arbejdes der både med betoner, der er fremstillet af forfatteren og betoner, der er leveret af Unicon A/S. For de betonerne, der er støbt af forfatteren, er der med udgangspunkt i projektets problemformulering valgt en reference betontype og ud fra denne type, er der varieret på nogle udvalgte parametre, for at undersøge parameterens indflydelse på elasticitetsmodulet. Disse parametre er volumenandelen af tilslag, type af tilslagsmaterialet samt v/c-forholdet. På figur 5.1 er det illustreret, hvilke parametre der varieres på af forfatteren.



Figur 5.1 – Illustration af betonsammensætningen af de betoner, der laves af forfatteren.

Betegnelserne på figur 5.1 refererer til:

- T1 er tilslag bestående af bakkesand (0-4 mm) og søsten (8-16 mm)
- T2 er tilslag bestående af bakkesand (0-4 mm) og granit (8-16 mm)
- T3 er tilslag bestående af bakkesand (0-4 mm) og bauxit (5-8 mm)
- $P1 \quad {\rm er \ cementpasta \ med } \nu/c = 0,55$
- P2 er cementpasta med $\nu/c = 0, 7$
- $T3 \quad {\rm er \ cementpasta \ med } \nu/c = 0,4$

For de betonerne, der er støbt af Unicon A/S, er der tilsvarende med udgangspunkt i projektets problemformulering varieret på én parameter - nemlig indhold af puzzolaner (mikrosilica og flyveakse). På figur 5.2 er betonsammensætningerne illustreret.



Figur 5.2 – Illustration af betonsammensætningen af de betoner, der laves af Unicon A/S.

Betegnelserne på figur 5.2 refererer til:

- T4 er tilslag bestående af bakkesand (0-1 mm) og knust granit (8-16 mm)
- P4 er cementpasta med $(\nu/c)_{\text{aekv}} = 0,432$ indeholdende mikrosilica og flyveaske
- P5 er cementpasta $med(v/c)_{wkv} = 0,411$ indeholdende flyveaske
- T6 er cementpasta med $(\nu/c)_{\text{ækv}} = 0,433$

I det følgende vil der blive henvist til betonblandingerne vha. "koordinaterne", der er givet på figur 5.1 og 5.2. Det bør her bemærkes, at blanding 1a, 2a, og 3a er den samme type, der blot fungerer som reference ved variation af parametrene - derfor vil denne type blive henvist til som "1a".

Ved proportioneringen af alle betonerne er følgende overordnede forudsætninger tilstræbt:

- Naturligt luftindhold på 1,5-2,0%
- Sætmål på 60-100 mm

Forudsætningerne er opstillet for at få nogle betonblandinger, der er sammenlignelige ved, at der kun varieres på en af de parametre, som er givet ifølge figur 5.1 og 5.2. Dvs. såfremt luftindholdet er udenfor det givne interval kasseres blandingen, da det vil give anledning til stor usikkerhed. Dog er det vejledende, at sætmålet skal ligge inden for det givne interval, da det ikke direkte vil gøre sammenligningsgrundlaget usikkert. Sætmålet bruges kun til at vurdere bearbejdeligheden af den friske beton. Såfremt sætmålet er uden for intervallet, kan der foretages en korrektion i sammensætningen på en sådan måde, at v/c-forholdet forbliver uændret (ved for lavt sætmål tilsættes vand og cement, og ved for højt tilsættes sand og sten). I dette forsøg ses der dog bort fra denne form for korrektion, da det er ønsket at sammenligne betonerne, hvor kun én parameter bliver ændret. Imidlertid tilsættes en smule superplastificeringsstof, hvis sætmålet er meget lavt og bearbejdeligheden meget dårlig.

5.2 Materialer

I tabel 5.1 er der givet en liste over de materialer, der er anvendt til betonfremstilling af forfatteren.

	Туре	Densitet $[kg/m^3]$	Absorption [vægt%]
Cement	Rapid CEM I 52,5N(MS/LA/ $<$ 2)	3150	-
Vand	Koldt postevand	1000	-
Superplast	Glenium Sky 680	1050	-
Sand	Bakkesand (0-4 mm)	2632	0,4
Sten (T1)	Søsten (8-16 mm)	2570	1,1
Sten $(T2)$	Knust granit (8-16 mm)	2640	0,2
Sten (T3)	Bauxit (5-8 mm)	3332	1,78

Tabel 5.1 – Materialer anvendt til betonfremstilling af forfatteren.

Da der ikke har været oplysninger tilgængelig omkring den bauxit, der er anvendt, er densiteten og absorptionen, der er givet i tabel 5.1, bestemt eksperimentelt. Proceduren er nærmere beskrevet i appendiks A.

I tabel 5.2 er der givet en liste over de materialer, der er anvendt til betonfremstilling af Unicon A/S.

	Туре	Densitet $[kg/m^3]$
Cement	Rapid CEM I 52,5N(MS/LA/ <2)	3160
Cement	Lavalkali CEM I 42,5N(HS/EA/<2)	3200
Flyveaske	Emineral B4	3200
Mikrosilica	Mikrosilica Fesil	2250
Vand	Koldt postevand	1000
Luftindblandingsmiddel	Conplast 316 AEA 1:5	1003
Superplast	Glenium Sky 531	1100
Plastificering	Conplast 212	1170
Sand $(0-2 \text{ mm})$	A0002 Bradsted	2640
Sand $(0-1 \text{ mm})$	E0001 Bradsted Krogh	2640
Knust granit (4-8 mm)	E0408 Brekke-Halden	2640
Knust granit (8-16 mm)	M0816 Bradsted	2590
Knust granit (8-16 mm)	E0816 Brekke-Halden	2640

Tabel 5.2 – Materialer anvendt til betonfremstilling af Unicon A/S.

5.3 Proportionering

Med udgangspunkt i forudsætningerne opstillet i afsnit 5.1 og materialerne beskrevet i afsnit 5.2 vil betonerne, der er støbt af forfatteren blive proportioneret i dette afsnit. Proportionering forklares i dette afsnit generelt og kan ses for de specifikke betonblandinger i *(Proportionering.xls)*, der kan findes på vedlagt appendiks-cd.

For alle betonblandingerne er v/c-forholdet og cementpasta
ens volumenandel af betonen kendt ifølge figur 5.1. Med baggrund i disse oplysninger kan 28-døg
ns trykstyrken estimeres

via Bolomeys formel, jf. formel 3.1, idet der kun antages et naturligt luftindhold i betonen. Derudover kan cementindholdet beregnes via omskrivning af udtrykket i formel 5.1.

$$\mathsf{I} - \mathfrak{n} = \frac{\mathsf{C}}{\rho_{\mathsf{c}}} + \frac{\mathsf{V}}{\rho_{\mathsf{v}}} + \mathsf{L} \Leftrightarrow \tag{5.1}$$

$$C = \frac{(1-n) - L}{\frac{1}{\rho_{c}} + \frac{\nu/c}{\rho_{\nu}}}$$
(5.2)

hvor

1-n	er cementpastaens volumenandel af betonen $\left[m^3/m^3\right]$
С	${\rm er \ cementindholdet \ [kg/m^3]}$
V	er vandbehovet $[kg/m^3]$
L	er det naturlige luft indhold $[m^3/m^3]$
ρ_c	er cementens densitet $[kg/m^3]$
ρ_{ν}	er vandets densitet $[kg/m^3]$

På baggrund af cementindholdet kan vandbehovet beregnes vha. udtrykket i formel 5.3.

$$\mathbf{V} = \mathbf{v}/\mathbf{c} \cdot \mathbf{C} \tag{5.3}$$

Det er valgt at hold det indbyrdes forhold mellem sand- og stenindhold (efter volumen) konstant - nemlig halvt sand og halvt sten, se formel 5.4 og 5.5.

$$S_{\text{sand}} = 0, 5 \cdot n \cdot \rho_{\text{sand}}$$
(5.4)

$$S_{\text{sten}} = 0, 5 \cdot n \cdot \rho_{\text{sten}}$$
 (5.5)

 $\begin{array}{ll} S_{sand} & {\rm er \ sandindholdet \ [kg/m^3]} \\ S_{sten} & {\rm er \ stenindholdet \ [kg/m^3]} \\ \rho_{sand} & {\rm er \ sandets \ densitet \ [kg/m^3]} \\ \rho_{sten} & {\rm er \ stenens \ densitet \ [kg/m^3]} \\ \end{array}$

Med udgangspunkt i denne proportionering opstilles en oprindelig recept baseret på ssdmateriale.

5.4 Recepter

I tabel 5.3 ses recepterne på de syv betontyper, der støbes af forfatteren. Recepterne er fremkommet på baggrund af proportioneringen beskrevet i afsnit 5.3 og kan ses i *(Proportionering.xls)*, der kan findes på vedlagt appendiks-cd. Med udgangspukt i disse recepter støbes der prøvelegemer til forsøg.

	1a	1b	1c	2b	2c	3b	3c
(v/c) [-]	$0,\!55$	$0,\!55$	$0,\!55$	0,55	$0,\!55$	0,70	$0,\!40$
n [-]	0,70	$0,\!63$	0,77	0,70	0,70	0,70	0,70
Tilslagstype	T1	T1	T1	T2	T3	T1	T1
Cement	329	409	248	329	329	280	397
Vand	181	225	134	181	181	196	156
Superplast	-	-	2,48	-	-	-	$3,\!97$
Sand	921	829	1013	921	921	921	921
Sten	900	810	989	924	1166	900	900

Tabel 5.3 – Recepter på betonblandingerne, der støbes af forfatteren. Vægte angivet ikg pr. m^3 beton og er baseret på SSD-tilslagsmaterialer.

I tabel 5.4 ses recepterne på de betonblandinger, der er støbt af Unicon A/S; der kan findes yderligere oplysninger om recepterne i *(Unicon Recepter.xls)*, der kan findes på vedlagt appendiks-cd. Med udgangspunkt i disse recepter er der ligeledes støbt prøvelegemer til forsøg.

	U1	U2	U3	U4
$(v/c)_{ackv}$ [-]	$0,\!51$	$0,\!432$	$0,\!411$	$0,\!433$
n [-]	$0,\!675$	$0,\!655$	$0,\!634$	$0,\!665$
Cement	264	313	348	379
Flyveaske	53	46	52	-
Mikrosilica	-	19	-	-
Vand	146	147	157	162
${\it Luftindblandingsmiddel}$	$0,\!48$	0,74	$0,\!55$	$0,\!24$
Superplast	-	-	-	$0,\!53$
Plastificering	$2,\!54$	$2,\!65$	$2,\!81$	$2,\!28$
Sand	761	631	598	687
Sten	1005	1091	1077	1105

Tabel 5.4 – Recepter på betonblandingerne, der er støbt af Unicon A/S. Vægte angivet i kg pr. m³ og er baseret på SSD-tilslagsmaterialer.

Betontyperne kaldt U2, U3, U4 i tabel 5.4 har ifølge Unicon A/S samme karakteristiske trykstyrke og tilnærmelsesvis samme ækvivalente v/c-forhold og volumenandel af tilslagsmaterialer, derfor kan disse sammenlignes. Som tidligere beskrevet støbes der ikke betontyper af forfatteren selv, hvor der varieres på indholdet af puzzolaner. I stedet benyttes betontyperne kaldt U2, U3, U4; hvor U4 ikke indeholder nogen form for puzzolaner, U3 indeholder flyveaske og U2 indeholder både flyveaske og mikrosilica.

Kapitel 6

Forsøgsprocedure

I dette kapitel redegøres der for den anvendte blandingsprocedure til fremstilling af de forskellige betontyper - dette omfatter udelukkende de betoner, der er lavet forfatteren og altså ikke dem, der er lavet af Unicon A/S. Derudover beskrives de anvendte prøvelegemer og proceduren for udstøbning og lagring. Endvidere redegøres der for den generelle forsøgsprocedure for både forsøg foretaget på den friske beton og forsøg foretaget på den hærdede beton. I den forbindelse gives en beskrivelse af, hvorledes de enkelte forsøg gennemføres og hvilke parametre, der bestemmes gennem de enkelte forsøg. For hver betontype blandes en mængde på 40 liter til udstøbning af 12 cylindre samt forsøg foretaget på den friske beton. For alle betontyper er det gældende at både blandingsproceduren og forsøgsproceduren er ens, således at resultaterne er sammenlignelige.

6.1 Blanding af beton

Blandingen af den enkelte betontype foretages på baggrund af recepterne beskrevet i afsnit 5.4 med udgangspunkt i *(Vejledningen til laboratorieøvelser.pdf)*, der kan findes på vedlagt appendiks-cd. Før hver blanding bestemmes tilslagets fugtindhold af en repræsentativ mængde sten og sand. Sammensætningen af blandingen justeres herefter i henhold til tilslagets aktuelle fugtindhold, således at den nøjagtige mængde vand og tilslag tilsættes.

Fugtindholdet i tilslaget bestemmes som differensen mellem den aktuelle mængde vand i tilslaget og det pågældende materiales absorption. Indholdet af den aktuelle mængde vand i tilslaget bestemmes ved at udtage en repræsentativ prøve og udtørre denne ved høj temperatur. Herefter er det muligt at bestemme indholdet af vand som massetabet mellem den våde og den tørre prøve. Massetabet omregnes efterfølgende således, at det udtrykkes i procent af prøvens tørrede masse. Tilslagets absorption er af leverandøren bestemt som massen af vandet i kornene i vandmættet overfladetør tilstand divideret med massen af kornene i tør tilstand. Fugtindholdet i tilslaget trækkes herefter fra vandmængden ifølge recepten, hvorved det totale indhold af vand i blandingen bliver som udregnet via proportioneringen.

Delmaterialerne eksklusiv vandet (og evt. superplastificeringsstoffer) afvejes og fyldes i blandemaskinen i rækkefølgen: Sten, sand, cement. Dog fugtes blandekaret med en våd klud inden delmaterialerne tilsættes for på den måde at mindske risikoen for, at karret suger vand ud af blandingen.

Blandemaskinen der benyttes er vist på figur 6.1 og er en tvangsblandemaskine af typen Eirich SKG 1 med en kapacitet på 50 liter.



Figur 6.1 – Tvangsblandemaskine af typer Eirich SKG 1.

I blandemaskinen blandes de faste materialer i et minut, hvorefter vandet tilsættes. Der blandes yderligere i fire minutter, hvorefter blandingen inspiceres, og der blandes videre i 1 min. Hvis betonens konsistens vurderes at være uændret, er blandingen færdig. Dette forløb er illustreret i figur 6.2, hvor det bemærkes, at tidspunktet for vandtilsætning er angivet som nulpunkt, idet det ligeledes betragtes som nulpunkt for hærdetiden.



Figur 6.2 – Blandingsforløb af betonerne.

Når blandingen er færdig, udføres prøvningen af den friske beton umiddelbart efter.

6.2 Prøvning af frisk beton

I dette afsnit beskrives forsøgene udført på den friske beton. Alle blandinger har for den friske beton fået målt sætmål, luftindhold og densitet. Til sidst vises resultaterne af prøvningen af den friske beton, hvilket både gælder betonerne lavet af forfatteren og af Unicon A/S.

6.2.1 Sætmål

Sætmålet siger noget om betonens konsistens og dermed bearbejdelighed. Denne egenskab er nødvendig at have kendskab til for at kunne vurdere betonens evne til at kunne fylde cylinderformene. Sætmålet vurderes at skulle ligge i intervallet 60-100 mm for at have en optimal bearbejdelighed. Såfremt sætmålet er større end angivet i intervallet, foretages der ingen korrektion i sammensætningen. Er sætmålet derimod betydelige mindre – altså så lavt at det vurderes at være umuligt at få betonen til at flyde ud i cylinderformene – tilsættes en smule superplastificeringsstof.

Til at bestemme sætmålet anvendes et ikke-sugende underlag (et vædet gulv) samt en keglestubform, se opstillingen på figur 6.3.



Figur 6.3 – Forsøgsopstilling ved udførelse af sætmålsforsøg.

Keglestubben fyldes gradvist op med beton, mens den holdes ned mod underlaget således, betonen forhindres i at løbe ud forneden under opfyldning. Til at starte med fyldes keglestubben ca. en tredjedel op, hvorefter der med et massivt rundjern stampes 25 gange i betonen. Hermed fordeles betonen, og luften presses ud. Ophældning og stampning gentages tre gange i alt - indtil keglestubformen er fyldt op. Herefter skrabes overskydende beton væk fra toppen af formen, således betonen får en vandret overflade. Hernæst løftes formen i en jævn bevægelse op over betonblandingen. Sætmålet bestemmes ved at måle højdeforskellen mellem øverste punkt på betonkeglen og keglestubformen.

6.2.2 Luftindhold

Luftindholdet bestemmes for at kontrollere, om det stemmer over ens med det, der er antaget under proportionering af betonblandingerne - der er for alle betontyper antaget et luftindhold svarende til naturligt luftindhold på 1,5-2,0 %.

Luftindholdet bestemmes ved at anvende manometermetoden. Måleudstyret, der anvendes til forsøget, er vist på figur 6.4.



Figur 6.4 – Press-Ur-Meter til måling af luftindhold ved manometermetoden.

Måleudstyret vist på figur 6.4 er et Press-Ur-Meter, som består af en vandtæt beholder og en overdel med en trykmåler og luftpumpe. Forsøget gennemføres ved at fylde beholderen med beton under komprimering svarende til komprimering af prøvelegemerne - dette gøres for at bestemme det naturlige luftindhold, der er i prøvelegemerne. Overfladen af beholderen afrettes med savende bevægelser, og kanten af beholderen rengøres, således overdelen kan lukkes helt tæt til beholderen. Hulrummet mellem betonen og overdelen fyldes med vand gennem en af ventilerne, indtil alle luftlommer er fjernet. Derefter pumpes luft i manometerets luftkammer, hvorefter hovedluftventilen åbnes, og luftindholdet aflæses slutteligt på måleskiven.

6.2.3 Densitet

Densiteten af den friske beton bestemmes i forbindelse med bestemmelse af luftindholdet, idet voluminet af beholderen er kendt. På denne måde bestemmes densiteten ved at måle vægten af det kendte volumen.

6.2.4 Resultater af prøvning af frisk beton

I de forrige afsnit er metoderne, der er benyttet til at måle sætmål, luftindhold og densitet, gennemgået. I tabel 6.1 kan resultaterne af målingen af den friske beton ses. I tabellen er det for en betontype (1b) ikke angivet sætmål, hvilket skyldes, at betonen flød helt ud. Resultaterne af målingerne på den friske beton kan ligeledes ses i *(Proportionering.xls)*, der kan findes på vedlagt appendiks-cd.

	1a,2a,3a	1b	1c	2b	2c	3b	3c	U1	U2	U3	U4
Sætmål [mm]	155	-	43	52	25	195	245	160	130	150	120
Luftindhold [%]	2,0	$1,\!0$	2,0	$1,\!0$	$2,\!0$	$2,\!0$	$2,\!0$	7,0	5,0	7,1	7,4
Densitet $[kg/m^3]$	2364	2332	2244	2360	2610	2312	2377	2196	2208	2205	2337

Tabel 6.1 – Resultater af prøvning af den friske beton.

6.3 Udstøbning og lagring af prøvelegemer

Af hver blanding udstødes 12 prøvelegemer i cylinderforme med en diameter på 100 mm og en højde på 200 mm, hvilket stemmer overens med kravene angivet i (DS/EN 12390-1, 2002). De anvendte forme kan ses på figur 6.5.



Figur 6.5 – Cylinderform.

Cylinderformene fyldes gradvist med beton mens, de er placeret på vibrationsbordet. Til at starte med fyldes formene en tredjedel, hvorefter vibrationsbordet startes og vibrer i 20 sekunder. Dette gentages ved at fylde en tredjedel mere beton i, og til sidst fyldes formene helt op, hvorefter formene vibreres indtil, det vurderes, at der er en passende mængde luftindhold. Denne metode til opfyldning af formene anvendes for at mindske antallet af luftlommer mest muligt samtidig med, at prøvelegemerne bliver ensartede. Efter opfyldning af formene skrues låget fast, og tidligst efter 16 timer afformes prøvelegemerne (DS/EN 12390-2, 2002). Mens prøvelegemerne er i formene, lagres de liggende ved en temperatur på ca. 20°C. Efter afformning lagres prøvelegemerne i et vandfyldt bassin med en temperatur på ca. 20°C.

6.4 Prøvning af hærdet beton

I dette afsnit beskrives forsøgene udført på den hærdede beton - dette indbefatter densitet samt udvikling af trykstyrke og elasticitetsmodul. Betonblandingerne, der er lavet af forfatteren, er alle udstøbt i 12 cylindre (Ø100×200), der er lagret i vand indtil forsøgene udføres. Der er udført målinger for tre terminer; 2, 7 og 28 modenhedsdøgn. Der er altså benyttet fire prøvelegemer for hver termin; én cylinder benyttes til at bestemme trykstyrken, og de tre øvrige benyttes til at bestemme densitet, elasticitetsmodul og trykstyrke. Grunden til, at én cylinder benyttes til at bestemme trykstyrke først, er, at det er nødvendigt at have kendskab til denne, når elasticitetsmodulet skal måles, hvilket uddybes i afsnit 6.4.3. Betonblandingerne, der er lavet af Unicon A/S, er alle udstøbt i 18 cylindre (Ø100×200). Der er udført målinger for seks terminer; 1, 2, 3, 7, 28 og 56 modenhedsdøgn. Der er altså benyttet tre prøvelegemer for hver termin; alle tre benyttes til at bestemme densitet, elasticitetsmodul og trykstyrke. Det er ikke her nødvendigt at teste trykstyrken inden, da denne er oplyst af Unicon A/S, idet de sideløbende laver trykstyrkeforsøg dog på Ø150×300 cylindre.

6.4.1 Densitet

Densiteten af den hærdede beton bestemmes ud fra prøvelegemets vægt og volumen. Voluminet af cylinderen ($V = \pi \cdot (d/2)^2 \cdot h$) bestemmes ved at angive diameteren som en middelværdi af tre målinger foretaget i både top og bund med en indbyrdes vinkel på 60°, og højden angives tilsvarende som en middelværdi af tre målinger foretaget med en indbyrdes vinkel på 120°, jf. (DS/EN 12390-3, 2002). Voluminet af de testede cylindre er dog kun bestemt på denne måde for de første cylindre, der er testet af hver betonblanding. Dette er gjort, da det tidligt viste sig, at der var meget lav spredning på diameteren og højden for betoncylindrene. For de øvrige cylindre er det antaget, at diameteren er 100 mm og højden er 200 mm.



Figur 6.6 – Stiplede linier viser positioner for måling af diameter (tv.) og for måling af højde (th.). (DS/EN 12390-3, 2002, fig. B.3 og B.4)

6.4.2 Trykstyrke

Ved hver termin måles trykstyrken på de tre cylindre umiddelbart efter måling af elasticitetsmodulet. Trykprøvemaskinen, der både anvendes til måling af trykstyrken og elasticitetsmodulet, er vist på figur 6.7 og er af typen TONIPACT 3000. Prøvemaskinen består af en trykpresse og en styringsenhed.



Figur 6.7 – Prøvemaskine af typen TONIPACT 3000.

Belastningshastighed og brudtype indstilles på styringsenheden. For alle forsøgene er belastningshastighed sat til 6,3 kN/s ved måling af trykstyrke. Prøvemaskinen kan indstilles til at køre to forskellige typer brud, hvor der henholdsvis registreres den maksimal opnåelige belastning og det totale brud - i dette tilfælde aflæses kun den maksimale opnåelige belastning. Lasten aflæses i kN på et display på styringsenheden, herudfra omregnes den viste last til den sande last i overensstemmelse med kalibreringsfunktionen for trykprøvemaskinen, se formel B.2 i appendiks B. Brudlasten omregnes herefter til brudspænding, idet der fra tidligere opmålinger er kendskab til trykfladens areal.

Fremgangsmåden ved udførelse af trykprøveforsøgene er:

- 1. Placer prøvelegemet centreret i prøvemaskinen.
- 2. Belast prøvelegemet indtil den maksimale brudlast opnås.
- 3. Aflæs den opnåede brudlast og beregn herudfra brudspændingen (trykstyrken).

6.4.3 Elasticitetsmodul

Ved hver termin måles elasticitetsmodulet på de tre cylindre. Trykprøvemaskinen, der anvendes, er den samme som beskrevet ved måling af trykstyrke, jf. afsnit 6.4.2. Forsøgene er udført med udgangspunkt i (DS/EN 13412, 2006), der indeholder to metoder til måling af elasticitetsmodul. Metoden, der danner grundlag for forsøgene, er detaljeret beskrevet i kapitel C. Princippet bag forsøgene er at måle sekantelasticitetsmodulet ved at påføre prøvelegemet en kontrolleret aksial tryklast og relatere spændingen med tøjningen. Udstyret, der anvendes til måling af tøjninger, kan ses på figur 6.8 (tv.). Udstyret er fremstillet af Aalborg Universitets laboratorium for betonteknologi, hvor flytningsmålerne er clipgauges fra HBM af typen DD1. Forsøgsopstillingen til bestemmelse af elasticitetsmodulet er ligeledes vist på figur 6.8 (th.).



Figur 6.8 – Tv. Udstyr til måling af tøjninger. Th. Forsøgsopstilling til måling af elasticitetsmodul.

Udstyret til måling af tøjningen består af to ringe, som er fastgjort til prøvelegemet med stålspidser med en indbyrdes vinkel på 120°, dermed bliver tøjningerne målt over afstand mellem de to ringe. Denne afstand er 100 mm, og derfor er tøjningen i procent den samme som i millimeter. Mellem ringene er der placeret tre af de tidligere nævnte clipgauges - den samlede tøjning af prøvelegemet bestemmes som et gennemsnit af de tre målinger.

Fremgangsmåden ved udførelse af forsøgene til måling af elasticitetsmodul er:

- 1. Placer prøvelegemet (med flytningsmåler påmonteret) centreret i prøvemaskinen.
- 2. Belast prøvelegemet indtil en tredjedel af brudlasten opnås gentag tre gange.
- 3. Belast prøvelegemet en fjerde gang indtil en tredjedel af brudlasten opnås. Data opsamles i denne omgang.
- 4. Kontroller dataene ved at se om forskellen mellem den enkelte flytningsmåler og middelværdien af de tre flytningsmålere overstiger ± 10 %.
- 5. Optegn arbejdskurven og bestem elasticitetsmodulet som hældningen af denne kurve.

Belastningshastigheden er ved forsøgene 2,4 kN/s modsat trykstyrkeforsøgene, hvor den var noget højere - nemlig 6,3 kN/s. Den påførte aksiale last og de tre tøjninger opsamles elektronisk med en frekvens på 5 Hz, herudfra omregnes den målte last til den sande last i overensstemmelse med kalibreringsfunktionen for trykprøvemaskinen, se formel B.1 i appendiks B. Herudfra kan arbejdskurven for prøvelegemet optegnes. Ud fra denne arbejdskurve

bestemmes elasticitetsmodulet som sekantelasticitetsmodulet, jf. afsnit 3.2, der er givet ved sekanthældningen, der svarer til en tredjedel af brudspændingen, se figur 6.9.



Figur 6.9 – Illustration af bestemmelse af sekantelasticitetsmodulet via forsøg.

Arbejdslinierne for de udførte forsøg har viste sig alle at være tilnærmelsesvis lineære indenfor området, hvor sekantelasticitetsmodulet beregnes ud fra. Se eksempelvis arbejdslinierne for 2-, 7 og 28-døgns målingerne for reference betonen 1a i figur 6.10.



Figur 6.10 - Arbejdslinie for 1a ved 2-, 7- og 28-døgns terminen.

Forsøgsresultaterne vil blive gennemgået yderligere i kapitel 8.

Kapitel 7

Forsøgsresultater: Trykstyrke

Der er gennem forsøgene, der blev beskrevet i kapitel 6, udført 153 målinger af trykstyrke og elasticitetsmodul, der kan ses i *(Forsøgsmålinger.xls)* på den vedlagt appendiks-cd. I det følgende vil der blive redegjort for de målinger, der er foretaget af trykstyrken. Betonernes udvikling af trykstyrke er i det følgende vist for middelværdierne for de cylindre, hvor både trykstyrke og elasticitetsmodul er målt, for hver termin. I appendiks D er proceduren til beregning af middelværdier, spredninger og variationskoefficienter beskrevet. Derudover kan alle måleresultaterne for trykstyrke ses i appendiks E. Forsøgsresultaterne er i appendikset givet i en tabel såvel som, de er vist grafisk som funktion af modenheden. For betontyperne U1, U2, U3, U4 er den eksponentielle egenskabsmodel ligeledes givet, idet denne er bestemt grafisk i overensstemmelse med appendiks G.

Variationskoefficienterne for målingerne er generelt lave - i de fleste tilfælde under 2%. Derfor og af overskuelighedsmæssige årsager er middelværdien alene vist i grafer i de følgende afsnit, når resultaterne præsenteres. I et enkelte tilfælde er variationskoefficienten dog meget høj, men dette kommenteres der på, når det givne tilfælde præsenteres.

I det følgende er forsøgsresultaterne gennemgået med fokus på betonsammensætningens indflydelse på trykstyrken. Afsnittet er delt op i følgende:

- 1. Indflydelsen af tilslagsvolumen
- 2. Indflydelsen af tilslagsarten
- 3. Indflydelsen af v/c-forhold
- 4. Indflydelsen af indhold af puzzolaner

7.1 Indflydelse af tilslagsvolumen

Indflydelsen af volumenandelen af tilslag på trykstyrken er undersøgt ved at sammenligne tre betontyper med varierende tilslagsvolumen og konstant v/c-forhold. Betonerne kaldes 1a, 1b og 1c i overensstemmelse med figur 5.1. Reference betonen, 1a, har en volumenandel af

tilslag på 70% og de to andre betoner har henholdsvis et 10% højere og et 10% lavere indhold af tilslag. Volumenandelen af tilslag i de betoner er altså:

- 63% i 1b
- 70% i 1a
- 77% i 1c

I figur 7.1 er udviklingen af trykstyrken for de tre betoner vist som funktion af modenheden.



Figur 7.1 – Trykstyrke som funktion af modenhed for betoner med varierende tilslagsvolumen og konstant v/c=0,55.

Af figur 7.1 kan det ses, at udviklingen af trykstyrken stort set har det samme forløb for de tre betontyper. Dog har 1c, der har det højeste indhold af tilslag, en højere trykstyrke ved de tidlige terminer, men efter 28 døgn har de næsten alle tre den samme trykstyrke - omkring 42 MPa.

På figur 7.2 er trykstyrken som funktion af volumenandelen af tilslaget vist for de forskellige betoner.



Figur 7.2 – Trykstyrke som funktion af tilslagets volumenandel vist for 2-, 7- og 28døgns målinger for betoner med varierende tilslagsvolumen og konstant v/c=0.55 (1a, 1b, 1c).

Som det ses af figur 7.2, kan der anes en tendens til, at trykstyrken stiger, når volumenandelen af tilslaget stiger - i hvert fald for de tidlige terminer.

Forsøgsresultaterne har alle en relativ lav spredning, jf. tabel E.1-E.3, hvorfor de enkelte målinger må betragtes som værende pålidelige. Betragtes betontyperne 1b og 1c med henholdsvis 63 og 77% volumenandel af tilslag - altså en forøgelse af tilslagsvoluminet på rundt regnet 20% - ses det, at trykstyrken forøges med:

- 25% ved 2 modenhedsdøgn,
- 10% ved 7 modenhedsdøgn og
- 4% ved 28 modenhedsdøgn.

Det er altså ikke en stor stigning ved 28 døgn. I henhold til afsnit 3.1 var det dog også at forvente. Ud fra målingerne tyder det på, at indflydelsen af volumenandelen af tilslag har en betydning ved de tidlige terminer. Dette kan skyldes, at tilslagspartiklerne har en låseeffekt, der derved gør, at en høj volumenandel af tilslag giver en høj styrke. Såfremt middelværdien plus/minus spredningen betragtes, vil intervallerne for de tre betoner ved 28 døgn overlappe hinanden, hvorfor det med udgangspunkt i disse målinger ikke kan siges, at volumenandelen af tilslag har indflydelse på trykstyrken.

7.2 Indflydelse af tilslagsstyrken

Indflydelsen af tilslagsstyrken på trykstyrken er undersøgt ved at sammenligne tre betontyper med samme volumenandel af tilslag, n = 0,70, og samme v/c-forhold, $\nu/c = 0,55$, men med varierende type af grove tilslag. Det grove tilslag i reference betonen, 2a, er søsten, mens de to andre typer indeholder stærkere materialer. De grove tilslagsmaterialer i betonerne er:

- Søsten i 2a
- Granit i 2b
- Bauxit i 2c

I figur 7.3 er udviklingen af trykstyrken for de tre betoner vist som funktion af modenheden. Det har vist sig, at der for 28-døgns målingerne af 2b er en enkelt værdi, der falder påfaldende udenfor de andre, hvilket resultere i en meget høj variationskoefficient – nemlig 11,6%, jf. tabel E.4. Derfor er der ligeledes i figur 7.3 vist en middelværdi af 28-døgns trykstyrken for 2b, der er baseret på to målinger; denne er i figuren markeret med grå.



Figur 7.3 – Trykstyrke som funktion af modenhed for betoner med varierende tilslagsmaterialer. Bemærk grå linie for 2b er middelværdi baseret på to målinger.

Af figuren kan det ses, at trykstyrken af betonerne indeholdende granit (2b) og bauxit (2c) har stort set samme forløb som funktion af modenheden, når middelværdien af 28-døgns trykstyrken er baseret på to målinger af 2b. Trykstyrken ved de tre terminer kan for disse to betontyper siges at være i samme størrelsesorden. Men betontypen indeholdende søsten (2a) har en noget lavere trykstyrke ved alle terminerne. Betontype 2c har ved 28 døgn en trykstyrke der er 8% højere end 2b og 30% højere end 2a.

Granits og søstens trykstyrke er af størrelsesordnen 100-250 MPa (Herholdt et al., 1985), mens trykstyrken af bauxit forventes at være noget højere. Det var dog forventet, at alle tre betontypers trykstyrke ville have samme størrelsesorden, da trykstyrken er forventet udelukkende at afhænge af cementpastaens styrke, idet denne fase for de betragtede betoner er den svageste. Cementpastaens styrke af de tre forskellige betontyper må ikke forventes at være betydeligt forskellige, da v/c-forholdet er det samme, i stedet må forklaringen kunne findes et andet sted. Der kunne foranlediges til at tro, at der var sket en fejl ved blandingen af betontype 2a, således at cementpastaen i denne beton havde fået en lavere styrke, da styrken af denne type falder markant udenfor de to andres. Denne blanding er dog veldokumenteret, idet den er lavet to gange med stort set samme resultat. Grunden, til denne blanding blev lavet to gange, er, at blandingen blev lavet som den først af rækken af betonblandinger og var dermed en forsøgsblanding. Blandingen blev gentaget for at sikre, at proceduren ved blandingen var sammenlignelige med de øvrige blandinger. Middelværdierne af trykstyrken for de to blandinger af 2a kan ses i tabel 7.1.

Alder	f _{c,1}	f _{c,2}
[døgn]	[MPa]	[MPa]
2	23,9	21,4
7	35,4	31,7
28	$45,\!4$	$41,\!3$

Tabel 7.1 – Middelværdi af trykstyrke ved 2, 7 og 28 døgn for de to blandinger af 2a.

Det tyder altså ikke umiddelbart på, at der er nogen fejl ved blandingen af 2a, dog er trykstyrken af den første blanding lidt højere end den af den anden blanding. Selvom den første blandings trykstyrke betragtes, ændres billedet ikke - trykstyrken af betonerne indeholdende granit og bauxit er stadig større. En forklaring kunne være tilslagets form og ruhed. Netop denne tendens er også fundet i (Kristensen and Skúlason, 2006), hvor trykstyrken af betoner indeholdende granit og søsten er sammenlignet. I dette studium findes det, at 28-døgns trykstyrken af betoner indeholdende granit er 8% højere end trykstyrken af betoner indeholdende søsten under forudsætning af, at v/c-forholdet og volumenandelen af tilslag er den samme. Betragtes figur 7.3 ses det, at ifølge dette studium er 28-døgns trykstyrken af 2b indeholdende granit ca. 15% højere end 28-døgns trykstyrken af 2a indeholdende søsten; dvs. der her er observeret en større indflydelse af tilslagets form og ruhed. Dette kan skyldes, at det ikke er præcis den samme tilslagstype, og der altid vil være en vis variation i tilslagets form og ruhed. I (Kristensen and Skúlason, 2006) findes det dog også, at trykstyrken af betoner indeholdende søsten er i sammen størrelsesorden som betoner indeholdende granit, såfremt der tilsættes mikrosilica. Dette skyldes at mikrosilica har stor indflydelse på overgangszonen mellem cementpastaen og tilslaget, og at granittens overflade er mere ru i forhold til søstenenes, hvilket giver bedre vedhæftning til cementpastaen.

I tilfældet af at tilslagets form og ruhed har indflydelse på betonernes trykstyrke, vil det også kunne forklare, hvorfor trykstyrken af betonerne indeholdende granit og bauxit er i samme størrelsesorden, idet begge disse materialer har en ru og kantet overflade.

7.3 Indflydelse af v/c-forhold

Indflydelsen af v/c-forholdet på trykstyrken er undersøgt ved at sammenligne tre betontyper med varierende v/c-forhold og konstant tilslagsvolumen. Reference betonen, 3a, har et v/c-forhold på 0,55 og de to andre betoner har henholdsvis et 27% lavere og et 27% højere v/c-forhold. v/c-forholdet i de tre betoner er altså:

- v/c=0,40 i 3c
- v/c=0,55 i 3a
- v/c=0,70 i 3b

I figur 7.4 er udviklingen af trykstyrken for de tre betoner vist som funktion af modenheden.



Figur 7.4 – Trykstyrke som funktion af modenhed for betoner med varierende v/cforhold og konstant volumenandel af tilslag.

Af figur 7.4 ses det, at trykstyrkeudviklingen for de tre betontyper nærmest ligger som parallelle linier. Af figuren ses det umiddelbart ligeledes, at v/c-forholdet har en markant indflydelse på trykstyrken - ved lavt v/c-forhold fås den højeste styrke. Allerede efter 2 modenhedsdøgn ses en markant forskel i trykstyrken; trykstyrken for 3a med middel v/c-forhold er ca. dobbelt så stor som trykstyrken for 3b med det høje v/c-forhold, og trykstyrken for 3c med det lave v/c-forhold er tre gange så stor som trykstyrken for 3b. Denne tendens fortsætter ved de følgende terminer. Efter 28 modenhedsdøgn er trykstyrken for 3a 1,5 gange så stor som for 3b, og trykstyrken for 3c er ca. 2,5 gange så stor som for 3b.

Det var dog også denne tendens, der var forventet ifølge Bolomeys formel, se afsnit 3.1. I figur 7.5 er forsøgsresultaterne for de tre terminer samt bolomeys formel for trykstyrken plottet som funktion af v/c-forholdet.

46



Figur 7.5 – Trykstyrke som funktion af v/c-forhold vist for 2-, 7- og 28-døgns målinger af betoner med varierende v/c-forhold og konstant volumenandel af tilslag (3a, 3b, 3c). Derudover er trykstyrken beregnet via Bolomeys formel, jf. formel 3.1, for beton med naturligt luftindhold og Rapid cement vist for tilsvarende terminer.

Generelt kan det siges, at kurverne for de tre terminer har samme forløb som Bolomeys formel. Efter 28 modenhedsdøgn er trykstyrken for de tre betoner dog noget højere end, hvad der forudsiges via Bolomeys formel; for 3c og 3a er trykstyrken ca. 20% højere, og for 3b er trykstyrken ca. 10% højere. Dog skal det nævnes, at Bolomeys formel gælder for intervallet $0,45 < \nu/c < 1,25$ - 3c med et v/c-forhold på 0,4 falder altså uden for dette interval.

7.4 Indflydelse af puzzolaner (mikrosilica, flyveaske)

Indflydelsen af puzzolaner på trykstyrken er undersøgt ved at sammenligne tre betontyper med og uden puzzolaner men med tilnærmelsesvis samme volumenandel af tilslag, $n \approx 0,66$, og samme ækvivalent v/c-forhold, $(\nu/c)_{\text{ækv}} \approx 0,43$. Efterfølgende er de sammenlignede betontyperne samt den indeholdende type af puzzolan listet op:

- U4 uden puzzolaner
- U3 indeholdende flyveaske
- U2 indeholdende flyveaske og mikrosilica

Af figur 7.6 er udviklingen af trykstyrken for de tre betoner vist som funktion af modenheden. Disse betoner er støbt af Unicon A/S, og er ligesom de cylindre, der er støbt af forfatteren,

 $\emptyset 100 \times 200$. Ved de samme terminer har Unicon A/S målt trykstyrke på $\emptyset 150 \times 300$ cylindre. I kapitel 10 er det beskrevet og diskuteret, om cylindernes størrelse har nogen indflydelse på den trykstyrke, der måles.



Figur 7.6 – Trykstyrke som funktion af modenhed for betoner med varierende indhold af puzzolaner.

Af figuren kan det anes, at trykstyrkeudviklingen for alle tre betontyper pænt følger en eksponentiel model; dette understreges ligeledes i appendiks E, hvor egenskabsmodellerne er givet. Det er dog iøjnefaldende, at trykstyrken af betontype U4 er betydeligt højere end de to andre, taget i betragtning at det er denne type, der ikke indeholder puzzolaner, men ellers ligner de andre betoner i sammensætningen. Den tidlige styrkeudvikling kunne forklares ved at prøvelegemerne kunne have været udsat for højere temperaturer ved lagring, og derfor kunne styrkeudviklingen være accelereret hurtigere. Dette forklarer dog ikke, hvorfor styrken på de seneste terminer er så meget højere; f.eks. er trykstyrken ved 28 modenhedsdøgn ca. 35% større end for betontype U2 og næsten 70% større for betontype U3.

En faktor, der kan give en lille forskel, er, at der i betonen U4 er benyttet Rapid cement i modsætningen til betonerne U2 og U3, hvor der er benyttet Lavalkali cement. Hvis Bolomeys formel betragtes, betyder det, at konstanterne K og α ændres fra K = 30 og α = 0,5 for Rapid cement til K = 29 og α = 0,7 for Lavalkali cement for 28-døgns styrken. Derudover har alle de tre betoner et tilstræbt luftindhold på 6%, men det viser sig ved måling på den friske beton, at luftindholdet i U4 er 5%, mens luftindholdet i U2 og U3 er omkring 7% - henholdsvis 7,1% og 7,4%. Der er altså en forskel på rundt regnet 3%, hvilket medfører en reduktion af trykstyrken på 12% (4% pr. luftprocent). Alt i alt kan dette give udslaget til forskellen i trykstyrke. Derfor ses der i første omgang bort fra denne blanding.

Selvom der ses bort fra U4, kan betontype U2 og U3 sammenlignes, idet indflydelsen af mikrosilica vurderes. Disse to betontyper ligner meget hinanden i styrkeudviklingen, såfremt egenskabsmodellerne angivet i appendiks E betragtes. Af egenskabsmodellerne ses det, at den lineære model skærer abscissen i samme punkt.

Af figur 7.6 ses det umiddelbart, at indholdet af mikrosilica forøger betonens trykstyrke. Efter 28 døgn er trykstyrken 26% højere for U2, der indeholder mikrosilica, end for U3. Denne forskel må dog forventes at være mindre for betoner, hvor det grove tilslag er granit, da overgangszonen er mindre i betoner indeholdende granit.

7.5 Opsummering

Indflydelsen på trykstyrken af volumenandel af tilslag, tilslagsart, indhold af puzzolaner og v/c-forhold er nu undersøgt. Generelt stemmer resultaterne af forsøgene overens med teorien beskrevet i afsnit 3.1. Betonens trykstyrke afhænger altså primært af cementpastaens styrke og sekundært af tilslagets form og ruhed.

Der kan af afsnittet opsummeres følgende:

- 1. Forøgelse i volumenandelen af tilslag her en lille og næsten ubetydelig indflydelse på trykstyrke. Der ses en lille stigning i trykstyrken, når volumenandel af tilslag stiger, men denne stigning kan siges at være tilfældig grundet usikkerheder, der er forbundet med blandingen og/eller forsøgsudførelsen.
- 2. Tilslagsmaterialets form og ruhed har stor indflydelse på trykstyrken; en ru og kantet overflade giver en højere trykstyrke.
- 3. v/c-forhold har betydelig indflydelse på trykstyrken; lavere v/c-forhold giver højere trykstyrke.
- 4. Indhold af mikrosilica har forholdsvis stor indflydelse på trykstyrken; mikrosilica giver en højere trykstyrke end estimeret.

Kapitel 8

Forsøgsresultater: Elasticitetsmodul

I det følgende vil der blive redegjort for de målinger, der er foretaget af elasticitetsmodulet. Betonernes udvikling af elasticitetsmodul er vist for gennemsnitsværdierne for de tre cylindre, hvor både trykstyrke og elasticitetsmodul er målt, for hver termin. På samme måde som for trykstyrken er variationskoefficienterne for målingerne generelt lave, hvorfor middelværdien alene er vist i grafer i de følgende afsnit, når resultaterne præsenteres. I appendiks D er proceduren til beregning af middelværdier, spredninger og variationskoefficienter beskrevet. Derudover kan alle måleresultaterne af elasticitetsmodulet ses i appendiks F. Forsøgsresultaterne er i appendikset vist på samme måde, som det var tilfældet for trykstyrken - resultaterne er altså vist i en tabel såvel som, de er vist grafisk som funktion af modenheden. For betontyperne U1, U2, U3, U4 er den eksponentielle egenskabsmodel ligeledes givet.

I det følgende er forsøgsresultaterne gennemgået med fokus på betonsammensætningens indflydelse på elasticitetsmodulet efter samme princip som i kapitel 7. Afsnittet er på sammen måde delt op i følgende emner:

- 1. Indflydelsen af tilslagsvolumen
- 2. Indflydelsen af tilslagsarten
- 3. Indfly delsen af v/c-forhold
- 4. Indflydelsen af indhold af puzzolaner

8.1 Indflydelse af tilslagsvolumen

Indflydelsen af volumenandelen af tilslag på elasticitetsmodul er ligeledes undersøgt for de tre betoner kaldt 1a, 1b og 1c, der har en volumenandel af tilslag på henholdsvis 70%, 63% og 77%. De tre betoner har alle et v/c-forhold på 0,55.

Af figur 8.1 er udviklingen af elasticitetsmodul for de tre betoner vist som funktion af modenheden.



Figur 8.1 – Elasticitetsmodul som funktion af modenhed for betoner med varierende tilslagsvolumen og konstant v/c=0,55.

Af figur 8.1 kan det ses, at udviklingen af elasticitetsmodul stort set har det samme forløb for de tre betontyper. 1c, der har det højeste indhold af tilslag, har det højeste elasticitetsmodul ved alle terminerne efterfulgt af elasticitetsmodulerne for henholdsvis 1a og 1b. Umiddelbart ses en tendens til, at elasticitetsmodulet er tiltagende ved stigende volumenandel af tilslag.



Figur 8.2 – Elasticitetsmodul som funktion af tilslagets volumenandel vist for 2-, 7- og 28-døgns målinger for betoner med varierende tilslagsvolumen og konstant v/c=0.55 (1a, 1b, 1c).

På figur 8.2 er elasticitetsmodulet som funktion af volumenandelen af tilslaget vist for de forskellige betoner. Af figuren understreges tendensen til, at elasticitetsmodulet stiger, når volumenandelen af tilslaget stiger for alle terminerne.

Betragtes betontyperne 1b og 1c med henholdsvis 63 og 77% volumenandel af tilslag, ses det, at når volumenandelen af tilslag forøges med ca. 20% forøges elasticitetsmodulet med:

- 12% ved 2 modenhedsdøgn,
- 10% ved 7 modenhedsdøgn og
- 8% ved 28 modenhedsdøgn.

Altså ses en vis stigning af elasticitetsmodul, når volumenandelen af tilslag forøges. I henhold til afsnit 3.2 var det dog også at forvente. Dog var en mere udpræget stigning af elasticitetsmodulet forventet ved en forøgelse af volumenandelen af tilslag på 20%. Under antagelse af et elasticitetsmodul af tilslaget på $E_t = 45$ GPa og af cementpastaen på $E_p = 15$ GPa var følgende stigninger ved 28 modenhedsdøgn forventet via de analytiske modeller vist i tabel 3.1:

- 12,4% ved Voigt model
- 18,9% ved Reuss model
- 16,4% ved Hirsch model
- 16,4% ved Counto model
- 16,7% ved Bache og Nepper-Christensen model

I kapitel 10 kommes der nærmere ind på størrelserne på de målte elasticitetsmoduler i forhold til de beregnede i modsætningen til her, hvor der kun ses relativt på udviklingen af elasticitetsmodulet i forhold til volumenandelen af tilslag.

8.2 Indflydelse af tilslagsstyrke

Indflydelsen af tilslagsstyrken på elasticitetsmodulet er ligeledes undersøgt ved at sammenligne de tre betoner kaldet 2a, 2b og 2c, hvis grove tilslagsmateriale henholdsvis er søsten, granit og bauxit. De tre betoner har samme volumenandel af tilslag, n = 0,70, og samme v/c-forhold, $\nu/c = 0,55$, men har altså varierende type af grove tilslag.

På figur 8.3 er udviklingen af elasticitetsmodul for de tre betoner vist som funktion af modenheden.

-⊶⊇c (Bauxit) -∍-2b (Granit) →2a (Søsten)



0 1 2 3 4 5 6 7 8 910 20 30 Alder [døgn] Figur 8.3 – Elasticitetsmodul som funktion af modenhed for betoner med varierende tilslagsmaterialer.

Af figur 8.3 ses det, at der ikke er en udpræget forskel på elasticitetsmodulet af de betoner, der indeholder søsten og granit (2a og 2b). Ligeledes ses det, at der for alle terminer er markant forskel på elasticitetsmodulet af betonen, der indeholder bauxit (2c), og de to betoner, der indeholder søsten og granit. Efter 28 modenhedsdøgn er elasticitetsmodulet af 2c mere end 35% større end elasticitetsmodulet af 2b.

Søsten og granit har som beskrevet tidligere i afsnit 3.2 et elasticitetsmodul af samme størrelsesorden, hvorfor betonerne indeholdende disse grove tilslagsmaterialer har et elasticitetsmodul af samme størrelsesorden.

I (Kristensen and Skúlason, 2006) er elasticitetsmodulet af betoner indeholdende granit og søsten sammenlignet ligesom, det var tilfældet for trykstyrken, se evt. afsnit 7.2. Hvad angår trykstyrken stemmer denne undersøgelse meget godt overens med, hvad der var fundet i det nævnte studium. Dog er tendensen en lidt anden, når elasticitetsmodulet betragtes. I studiet findes det, at 28-døgns elasticitetsmodulet af betoner indeholdende søsten er ca. 25% højere end elasticitetsmodulet af betoner indeholdende granit. Forskellen må skyldes, at det er forskellige materialer med forskellige elasticitetsmoduler - i litteraturen er der dog også givet et rimeligt bredt interval for elasticitetsmodulet af søsten og granit; 20 - 60 GPa (Herholdt et al., 1985, tab. 9.2).

Det var forventet, at tilslagsmaterialets elasticitetsmodul har stor indflydelse på betonens elasticitetsmodul. Under antagelse af et elasticitetsmodul af søsten/granit på $E_t = 45$ GPa, af bauxit på $E_t = 65$ GPa og af cementpastaen på $E_p = 15$ GPa samt en volumenandel af tilslaget på 70% var følgende forskelle mellem elasticitetsmodulerne af betoner indeholdende søsten/granit og bauxit ved 28 modenhedsdøgn forventet via de analytiske modeller vist i tabel 3.1:

• 38,9% ved Voigt model

- 15,6% ved Reuss model
- 24,8% ved Hirsch model
- 24,0% ved Counto model
- 29,4% ved Bache og Nepper-Christensen model

På samme måde som i forrige afsnit kommes der nærmere ind på størrelserne på de målte elasticitetsmoduler i forhold til de beregnede i kapitel 10.

8.3 Indflydelse af v/c-forhold

Indflydelsen af v/c-forholdet på elasticitetsmodulet er ligeledes undersøgt ved at sammenligne tre betontyper kaldet 3a, 3b og 3c, der har et v/c-forhold på 0,55, 0,70 og 0,40. Alle betoner har samme volumenandel af tilslag; nemlig n = 0,70.

På figur 8.4 er udviklingen af trykstyrken for de tre betoner vist som funktion af modenheden.



Figur 8.4 – Elasticitetsmodul som funktion af modenhed for betoner med varierende v/c-forhold og konstant volumenandel af tilslag.

Af figur 8.4 ses det, at udviklingen af elasticitetsmodul for de tre betontyper nærmest ligger som parallelle linier. Af figuren ses det ligeledes, at v/c-forholdet har en markant indflydelse på elasticitetsmodulet, som det også var set ved trykstyrken. Ved lavt v/c-forhold fås det højeste elasticitetsmodul. Allerede efter 2 modenhedsdøgn ses en markant forskel i elasticitetsmodulet; elasticitetsmodulet for 3a med middel v/c-forhold er ca. 25% større end elasticitetsmodulet for 3b med det høje v/c-forhold, og elasticitetsmodulet for 3c med det lave v/c-forhold er 40% større end elasticitetsmodulet for 3b. Denne tendens fortsætter ved de følgende terminer. Efter 28 modenhedsdøgn er elasticitetsmodulet for 3a ca. 25% større end elasticitetsmodulet for 3b, og elasticitetsmodulet for 3c er 30% større end elasticitetsmodulet for 3b.

I figur 8.5 er forsøgsresultaterne for de tre terminer plottet som funktion af v/c-forholdet.



Figur 8.5 – Elasticitetsmodul som funktion af v/c-forhold vist for 28-døgns målinger af betoner med varierende v/c-forhold og konstant volumenandel af tilslag (3a, 3b, 3c).

Af figur 8.5 understreges tendensen til at elasticitetsmodulet stiger, når v/c-forholdet falder, for alle terminerne.

Betragtes betontyperne 3b og 3c med henholdsvis $\nu/c = 0,70$ og $\nu/c = 0,40$, ses det, at når v/c-forholdet stiger med ca. 75% falder elasticitetsmodulet med:

- 40% ved 2 modenhedsdøgn,
- 30% ved 7 modenhedsdøgn og
- 30% ved 28 modenhedsdøgn.

Altså ses et mærkbart fald af elasticitetsmodul, når v/c-forholdet forøges. I henhold til afsnit 3.2 var det også at forvente ved de tidlige terminer, dog var det forventet, at elasticitetsmodulerne af de tre betoner var af samme størrelsesorden efter 28 døgn - og stort set det samme efter 91 døgn. I den forbindelse kunne det være interessant at foretage yderligere målinger ved senere terminer.

8.4 Indflydelse af puzzolaner (mikrosilica, flyveaske)

Indflydelsen af puzzolaner på elasticitetsmodulet er undersøgt ved at sammenligne de tre betontyper kaldet U2, som indeholder både flyveaske og mikrosilica, U3, som indeholder flyveaske, og U4, som ikke indeholder puzzolaner. Disse tre betoner har tilnærmelsesvis den samme volumenandel af tilslag, $n \approx 0,66$, og samme ækvivalent v/c-forhold, $(\nu/c)_{ækv} \approx 0,43$.

I figur 8.6 er udviklingen af elasticitetsmodul for de tre betoner vist som funktion af modenheden.



Figur 8.6 – Elasticitetsmodul som funktion af modenhed for betoner med varierende indhold af puzzolaner.

I appendiks F kan egenskabsmodellerne af elasticitetsmodulet ses for disse betoner. Her kan det ses, at forsøgsresultaterne pænt følger en eksponentiel model. Af figur 8.6 er det dog iøjnefaldende, at elasticitetsmodulet af betontype U4 er betydeligt højere end de to andre præcis, som det var tilfældet for trykstyrkeudviklingen. Umiddelbart virker det uforklarligt, hvorfor dette er tilfældet taget i betragtning, at betonerne ligner hinanden i sammensætning, og U4 ikke indeholder puzzolaner. Men ses der nærmere på den endelige recept, fremgår det, at der i U4 er benyttet granit kaldet "Ansit - Rekefjord", mens der i de andre to betoner er benyttet granit kaldet "Brekke - Halden". Det var meningen, at alle tre betoner skulle have den sidst nævnte type tilslag, men da Unicon A/S ikke havde mere af denne type tilslag på blandingsdagen, benyttede de i stedet det først nævnte tilslag, som er et stærkere materiale med et højere elasticitetsmodul - hvorfor U4 må forventes at have et højere elasticitetsmodul end U2 og U3. Derfor ses der bort fra denne blanding. I stedet fokuseres der på, hvilken indflydelse mikrosilica har på udviklingen og størrelsen af elasticitetsmodulet.

Af figur 8.6 ses det, er der er en tendens til, at elasticitetsmodulet udvikles hurtigere for betonen indeholdende mikrosilica (U2) frem for betonen uden mikrosilica (U3). Efter 1 døgn er elasticitetsmodulet dobbelt så stort for U2 end U3, efter 3 døgn er elasticitetsmodulet ca. 20% større for U2 end U3, men efter 28 døgn har de to betoners elasticitetsmodul nærmet sig hinanden, og efter 56 døgn er de stort set det samme. Forskellen mellem de to betoners elasticitetsmodul er ca. 8% efter 28 døgn og 4% efter 56 døgn.

8.5 Opsummering

Indflydelsen på elasticitetsmodulet af volumenandel af tilslag, tilslagsart, indhold af puzzolaner og v/c-forhold er nu undersøgt. For alle de undersøgte betonerne er der en tendens til, at allerede efter 7 døgn er der nået en værdi af elasticitetsmodulet, der er meget tæt på værdien målt efter 28 døgn modsat trykstyrken, der steg markant mellem alle terminerne.

Der kan af afsnittet opsummeres følgende:

- 1. Indflydelsen af volumenandelen af tilslag på elasticitetsmodulet er meget begrænset, idet en forøgelse i volumenandelen af tilslag giver en meget lille stigning i elasticitetsmodul.
- 2. Indflydelsen af det grove tilslags elasticitetsmodul på betonens elasticitetsmodul er markant. Betoner indeholdende tilslagsmaterialer med et højt elasticitetsmodul har et højt elasticitetsmodul, f.eks. gælder det for betoner indeholdende bauxit.
- 3. v/c-forholdet har betydelig indflydelse på elasticitetsmodulet; lavere v/c-forhold giver højere elasticitetsmodul.
- 4. Indhold af mikrosilica har stort set ingen indflydelse på elasticitetsmodulet.

Kapitel 9

Effekt af prøvelegemers størrelse på trykstyrken

I dette projekt er trykstyrken bestemt for cylinderformede prøvelegemer med en diameter på 100 mm og en højde på 200 mm. I Eurocode 2 foreskrives det, at betons enaksede trykstyrke skal bestemmes på støbte cylinderformede prøvelegemer med en diameter på 150 mm og en højde på 300 mm. Hvis ikke trykstyrken er bestemt for denne type prøvelegemer, skal der findes en omregningsfaktor - derfor skal der principielt bestemmes en omregningsfaktor for de målte trykstyrker. I dette kapitel diskuteres indflydelsen af, om trykstyrken er bestemt på $\emptyset100 \times 200$ eller $\emptyset150 \times 300$ cylindre.

For betontyperne støbt af Unicon A/S (U1, U2, U3, U4) foreligger der både målinger af trykstyrken målt på $Ø100 \times 200$ cylindre foretaget af forfatteren og på $Ø150 \times 300$ cylindre foretaget af Unicon A/S. Disse målinger kan ses i appendiks E, hvor alle målinger samt middelværdien for hver termin er angivet for alle $Ø100 \times 200$ cylindrene, mens kun middelværdien for hver termin er angivet for målinger på $Ø150 \times 300$ cylindrene. Alle målinger kan dog ses i (*Forsøgsmålinger.xls*), der kan findes på vedlagt appendiks-cd.

I figur 9.1 er udviklingen af trykstyrken for de fire betoner vist som funktion af modenheden for både målinger foretaget på $Ø100 \times 200$ og på $Ø150 \times 300$ cylindre.



Figur 9.1 – Trykstyrke som funktion af modenheden målt på henholdsvis Ø100×200 (sort) cylindre og Ø150×300 (rød) cylindre af betontyperne U1, U2, U3, U4.

Af figur 9.1 ses det, at målingerne umiddelbart ligger meget tætte, men der er en tendens til, at trykstyrken målt på $Ø100 \times 200$ cylindre er større end trykstyrken målt på $Ø150 \times 300$ cylindre efter 56 døgn. I figur 9.2 er trykstyrken målt på $Ø150 \times 300$ cylindrene udtrykt som funktion af trykstyrken målt på $Ø100 \times 200$ cylindrene.



Figur 9.2 – Trykstyrke målt på Ø150×300 cylindrene som funktion af trykstyrken målt på Ø100×200 cylindrene. Derudover er den bedste rette linie gennem punkterne givet.
Den bedste rette linie gennem punkterne har forskriften angivet i formel 9.1, der giver en regressionskoefficient på $R^2 = 0,994$ - altså en forholdsvis høj regressionskoefficient, hvorfor sammenhængen med god tilnærmelse kan siges at være lineær.

$$f_{c,\emptyset 150\times 300} = 0,9703 \cdot f_{c,\emptyset 100\times 200}$$
(9.1)

hvor

 $\begin{array}{ll} f_{c,\emptyset 150\times 300} & \mbox{er betonens trykstyrke målt på } \emptyset 150\times 300 \mbox{ cylindre [MPa]} \\ f_{c,\emptyset 100\times 200} & \mbox{er betonens trykstyrke målt på } \emptyset 100\times 200 \mbox{ cylindre [MPa]} \end{array}$

Af omregningsfunktionen i formel 9.1 kan det siges at trykstyrkerne målt på $\emptyset 100 \times 200$ cylindrene er ca. 3% højere end trykstyrken målt på $\emptyset 150 \times 300$ cylindrene. Det er altså generelt ikke en særlig stor afvigelse. I tidligere gældende standard DS 411 er der angivet en omregningsfaktor på 0,95, hvilket betyder, at trykstyrken målt på $\emptyset 100 \times 200$ cylindre skal reduceres med 5%. Såfremt denne omregningsfaktor bruges, vil trykstyrkerne af de betragtede betoner i mange tilfælde blive undervurderet. Derudover vil trykstyrkerne i dette projekt udelukkende blive brugt til interne sammenligninger, hvorfor der ses bort fra at omregne trykstyrkerne.

Kapitel 10

Vurdering af forsøgsresultater

I kapitel 7 og 8 blev målingerne af henholdsvis trykstyrke og elasticitetsmodul præsenteret i forhold til indflydelsen af forskellige parametre. I dette kapitel vil forsøgsresultaterne blive vurderet og diskuteret i henhold til de værdier, der var forventet af målingerne.

Generelt fremgår det af resultaterne præsenteret i kapitel 7 og 8, at elasticitetsmodulet udvikles hurtigere end trykstyrken. Allerede efter 7 døgn har elasticitetsmodulet en værdi, der er i samme størrelsesorden som elasticitetsmodulet efter 28 døgn - dog op mod 10% fra 28døgns elasticitetsmodulet. 7-døgns trykstyrken varierer til sammenligning med op til 40% fra 28-døgns trykstyrken. Grunden til dette er, at betons trykstyrke hovedsageligt afhænger af cementpastaens egenskaber. Cementpastaens egenskaber er afhængige af terminen og cementpastaens sammensætning. Betons elasticitetsmodul afhænger i særdeleshed af tilslagets elasticitetsmodul, der er uafhængig af både termin og betonsammensætningen. Derudover afhænger betons elasticitetsmodul også af cementpastaens egenskaber, der som nævnt er afhængig af termin og sammensætning. Derfor vil betons elasticitetsmodul ændres i takt med at betonen modnes. Grunden, til at elasticitetsmodulet bliver ved med at vokse ved de sene terminer i mere udpræget grad for U2 og U3, er, at der er blandet flyveaske i betonerne.

I tabel 10.1 er trykstyrke og elasticitetsmodul vist som middelværdien af målingerne foretaget efter 28 modenhedsdøgn - disse kaldes $f_{c,målt}$ og $E_{målt}$. Derudover er der i tabellen givet nogle udvalgte oplysninger om betonsammensætningen og de materialer, der indgår i betonblandingen. Der er vist hvor stor en volumenandel af betonen, der er tilslag, n. Derudover er forholdet mellem vand og cement, ν/c , vist. Begge disse oplysninger er hentet fra recepten for den pågældende beton, jf. afsnit 5.4. Ligeledes er betonens densitet, γ , vist. Denne er målt for den friske beton, jf. tabel 6.1. I tabel 10.1 er der desuden givet en værdi for cementpastaens elasticitetsmodul, E_p , og tilslagsmaterialets elasticitetsmodul, E_t . Disse værdier er ikke målt, men skønnet ud fra litteraturens beskrivelse.

Udover de målte værdier af 28-døgns trykstyrken og elasticitetsmodulet i tabel 10.1 er der i tabellen også vist de estimerede værdier af trykstyrken og elasticitetsmodulet.

For trykstyrken er der vist en estimeret værdi beregnet via udtrykkene beskrevet i afsnit 3.1. For betonerne støbt af forfatteren selv er der antaget et naturligt luftindhold i betonerne, og Bolomeyes formel (formel 3.1) er derved benyttet til at estimere trykstyrken ud fra v/cforholdet. For betoner støbt af Unicon A/S er det naturlige luftindhold antaget at være

Ċ	811 2	U2	U1	3c	3b	2c	2b	1c	1b	1a, 2a, 5	Nr.	
0,667	0,647	0,655	0,687	0,70	0,70	0,70	0,70	0,77	0,63	a 0,70	n	в
$0,\!433$	$0,\!411$	$0,\!432$	0,51	0,40	0,70	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	v/c	etonsan
2337	2205	2208	2196	2377	2312	2610	2360	2244	2333	2364	۲	nmensæ
15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	ч	tning
45	45	45	45	45	45	65	45	45	45	45	μ	-
52,0	$_{30,7}$	38,8	37,1	65,3	29,9	53,3	$50,\!4$	42,9	$41,\!3$	$41,\!3$	$f_{c,malt}$	Tryksty
54,2	50,1	46,7	43,7	60,0	27,9	39,5	39,5	39,5	39,5	39,5	$f_{c,Bolomey}$	/rke [MPa]
28,8	22,7	$24,\! 6$	32,0	37,0	$28,\!8$	45,2	33,2	$32,\!8$	30,3	35,7	Emålt	
36,1	$_{30,8}$	33,0	$32,\! 6$	38,6	$30,\!6$	$_{36,4}$	35,7	34,0	33,7	33,7	E_{EC2}	
28,6	25,1	26,7	26,4	$29,\!8$	24,9	28,7	28,4	$27,\!4$	27,1	27,2	E _{NA}	
35,0	34,0	34,7	35,3	36,0	36,0	50,0	36,0	38,1	33,9	36,0	E_{Voigt}	Ela
26,9	26,0	$26,\! 6$	$27,\!3$	28,1	28,1	32,5	28,1	30,8	25,9	28,1	E_{Reuss}	sticitets
$_{30,4}$	29,5	$_{30,1}$	30,8	$31,\! 6$	$31,\! 6$	$39,\!4$	$31,\! 6$	34,1	29,3	$31,\! 6$	E_{Hirsch}	nodul [G
30,3	$29,\!4$	30,0	30,7	31,5	31,5	39,0	31,5	34,0	29,2	31,5	E_{Counto}	Pa]
31,1	30,1	30,8	31,5	32,4	32,4	41,9	32,4	35,0	30,0	32,4	E_{Bache}	
28,8	23,6	24,3	25,0	33,8	24,7	45,7	29,0	26,2	27,9	28,7	E_{Takafumi}	

HWP

1,5%, mens luftindholdet målt på den friske beton, jf. tabel 6.1, er anvendt, og Bolomeyes korrigerede formel (formel 3.2) er benyttet til at estimere trykstyrken.

I figur 10.1 er estimatet beregnet via Bolomeys formel vist grafisk i forhold til 28-døgns målingerne som funktion af v/c-forholdet. I figuren er Bolomeys formel for beton med naturligt luftindhold og Rapid cement benyttet til at optegne estimatet. De viste 28-døgns målinger er korrigeret med 4% pr. luftprocent over det naturlige luftindhold, desuden er betoner indeholdende Lavalkali cement også korrigeret for dette.



Figur 10.1 – 28-døgns trykstyrke som funktion af v/c-forhold beregnet via Bolomeys formel, jf. formel 3.1, for beton med naturligt luftindhold og Rapid cement. Derudover er 28-døgns målinger vist, hvor målingerne er korrigeret med 4% pr. luftprocent over det naturlige luftindhold. Desuden er betoner indeholdende Lavalkali cement også korrigeret for dette.

Både af figur 10.1 og tabel 10.1 ses det, at målingerne af trykstyrken på betonerne lavet af forfatteren selv generelt er højere end det estimerede via Bolomeys formel, mens trykstyrken målt på betonerne støbt af Unicon A/S generelt er lavere end estimeret via Bolomeys korrigerede formel. Derudover kan det ses, at af de betoner, der er støbt af forfatteren, er det de to betoner indeholdende henholdsvis granit og bauxit (2b og 2c), der har den største afvigelse fra det estimerede. Af de betoner, der er støbt af Unicon A/S, er det U3 (indeholdende flyveaske), der har den største afvigelse fra det estimerede.

For de betoner der indeholdende puzzolaner, dvs. U2 og U3, er estimeringen baseret på det ækvivalente v/c-forhold. Det betyder, at der er taget højde for indholdet af puzzolaner gennem såkaldte aktivitetsfaktorer, jf. formel 3.3. For flyveaske er aktivitetsfaktoren sat til $k_{FA} = 0, 5$, og for mikrosilica er den $k_{MS} = 2, 0$. Disse aktivitetsfaktorer har forholdsvis stor indflydelse på det ækvivalente v/c-forhold og dermed den estimerede trykstyrke, hvorfor det er vigtigt, at denne vælges korrekt. I (Herholdt et al., 1985) er det angivet, at aktivitetsfaktoren for flyveaske ligger i området 0, 3 - 0, 5, mens den for mikrosilica ligger i området 3 - 5. Det betyder, at den valgte aktivitetsfaktor for flyveaske ligger i den høje del af inter-

vallet, hvilket gør, at det beregnede ækvivalente v/c-forhold sandsynligvis vil være større og trykstyrken dermed mindre. Men det betyder ligeledes også, at den valgte aktivitetsfaktor for mikrosilica ligger i den lave del af intervallet, hvilket gør, at det beregnede ækvivalente v/c-forhold med stor sandsynlighed vil være mindre og trykstyrken dermed større.

Bolomeys formel kan siges at give et relativt godt estimat af 28-døgns trykstyrken for betonerne med varierende volumenandel af tilslag (1a, 1b, 1c), idet det tidligere er vist, at volumenandelen af tilslag kun har en begrænset indflydelse på størrelsen af trykstyrken efter 28-døgn. Det kan dog diskuteres, hvorvidt der bør tages højde for volumenandelen af tilslag, når trykstyrken estimeres for tidligere terminer. Bolomevs formel giver derimod et knapt så godt estimat af betonerne med varierende type af tilslag (2a, 2b, 2c) - i hvert fald for betonerne indeholdende granit og bauxit. Dermed kan det siges at for at få et mere nøjagtigt billede af betonens 28-døgns trykstyrke, skal der tages højde for typen af tilslagsmateriale eller tilslagets form og ruhed, som diskuteret i afsnit 7.2. Hvis betonerne med varierende v/c-forhold (3a, 3b, 3c) betragtes, kan Bolomeys formel kun siges at give et godt estimat af trykstyrken, dog en smule konservativt. For betonerne indeholdende puzzolaner er U3 iøjnefaldende. Denne betontype afviger meget fra det, der er estimeret via Bolomeys formel. En forklaring kunne måske være, at denne beton indeholder flyveaske, så trykstyrken vil udvikles senere end, hvis indholdet af flyveaske var erstattet af cement. Betonen kaldet U2 indeholder dog også flyveaske, men estimatet af trykstyrken via Bolomeys formel er dog betydeligt tættere på det målte. Udover flyveaske indeholder U2, som tidligere nævnt, også mikrosilica, hvorfor det kunne forklare hvorfor der ikke er så stor afvigelse fra det estimerede. Dertil kan der siges at for at give det mest nøjagtige estimat af betons trykstyrke, bør der tages højde for indholdet af puzzolaner.

For elasticitetsmodulet er der i tabel 10.1 vist otte estimerede værdier. De estimerede værdier er baseret på tidligere beskrevne modeller; først er der vist to værdier af elasticitetsmodulet estimeret via modeller i standarderne, dernæst fem værdier estimeret via analytiske kompositmodeller og til sidst én værdi estimeret via en praktisk model baseret på empiri.

De første to estimater er beregnet vha. udtrykkene beskrevet i afsnit 2.2, hvor E_{EC2} er elasticitetsmodulet beregnet via udtrykket i Eurocode 2, se formel 2.1, og E_{NA} er elasticitetsmodulet beregnet via det danske nationale anneks til Eurocode 2, se formel 2.2. Forsøgsresultaterne af 28-døgns målingerne er afbildet i figur 10.2 sammen med graferne for udtrykkene i henholdsvis Eurocode 2 og det danske nationale anneks til Eurocode 2 til beskrivelse af elasticitetsmodul som funktion af trykstyrke.



Figur 10.2 – Elasticitetsmodul som funktion af trykstyrke for 28-døgns målinger vist sammen med standardernes beskrivelse heraf.

På samme måde er samtlige målinger optegnet i figur 10.3.



Figur 10.3 – Elasticitetsmodul som funktion af trykstyrke vist for samtlige forsøgsresultater sammen med standardernes beskrivelse heraf.

Af figur 10.3 tegnes en tendens, der minder om Rošes bisværm, jf. figur 2.1. Der kan altså ikke umiddelbart ud fra disse eksperimentelle målinger siges at være en entydig sammenhæng mellem betonernes trykstyrke og elasticitetsmodul. Af figurerne ses det ligeledes, at der er en tendens til, at udtrykket i det danske nationale anneks til Eurocode 2 overestimerer

elasticitetsmodulet en smule for et begrænset antal betoner. Derimod ses det også, at der er en tendens til, at udtrykket i Eurocode 2 overestimerer elasticitetsmodulet for stort set alle betonerne; kun middelværdien af målinger af elasticitetsmodulet af betoner indeholdende bauxit (2c) er højere end estimeret. Det kan generelt ikke ud fra dette eksperimentelle studium forsvares at benytte udtrykket i Eurocode 2 til estimering af betons elasticitetsmodul. Selvom det åbenlyst kan være et problem at overestimere elasticitetsmodulet, idet eksempelvis udbøjninger vil regnes mindre end i virkeligheden, kan det modsatte også være et problem, idet konstruktioner vil overdimensioneres, hvilket resulterer i et dyre design. Når elasticitetsmodulet estimeres via det danske nationale anneks til Eurocode 2 underestimeres elasticitetsmodulet i mange tilfælde.

Af det eksperimentelle studium er det fundet, at forholdet mellem elasticitetsmodul og trykstyrke for U4 er udtrykt godt via det danske nationale anneks til Eurocode 2. Udtrykket overestimerer derimod 28-døgns elasticitetsmodulet med ca. 10% for U2 og U3. Det er ligeledes fundet at udtrykket i Eurocode 2 passer godt på det, der er målt for 1a/2a/3a, 1c, 3c og U1 - det estimerede 28-døgns elasticitetsmodul afviger for disse betoner med op til 4% i forhold til det målte. De målte elasticitetsmoduler for 1b, 2b og 3b ligger mellem det, der er estimeret via de to standarders udtryk. Det kan ud fra dette ikke siges, om udtrykkene passer på en bestemt type betoner. Det kan dog siges, at der er en helt klar tendens til, at udtrykket i Eurocode 2 overestimerer elasticitetsmodulet for betoner indeholdende tilslagsmaterialer med middel elasticitetsmodul, som det er tilfældet for søsten og granit. Derimod ses det også, at begge udtryk underestimerer elasticitetsmodulet af betoner indeholdende tilslagsmaterialer med noget højere elasticitetsmodul, som det f.eks. er tilfældet for bauxit.

Efterfulgt af elasticitetsmodulerne estimeret via udtrykkene i standarderne kommer i tabel 10.1 fem elasticitetsmoduler estimeret via kompositmodeller. Beregningsmodellerne for E_{Voigt} , E_{Reuss} , E_{Hirsch} , E_{Counto} og E_{Bache} er givet i tabel 3.1. Fælles for beregningsmodellerne er, at de alle er to-fase modeller, der afhænger af cementpastaens elasticitetsmodul, E_p , tilslagsmaterialets elasticitetsmodul, E_t , samt volumenandelen af henholdsvis cementpastaen, 1 - n, og tilslaget, n. Volumenandelen af cementpastaen og tilslaget er kendt fra recepterne, jf. tabel 5.3 og 5.4, mens cementpastaens og tilslagets elasticitetsmodul er estimeret.

I figur 10.4 er elasticitetsmodulet afbildet som funktion af volumenandelen af tilslag beregnet vha. de fem analytiske modeller under antagelse af, at cementpastaens 28-døgns elasticitetsmodul er $E_p = 15$ GPa og tilslagets elasticitetsmodul er $E_t = 45$ GPa. Derudover er 2-, 7- og 28-døgns målinger for betoner 1a, 1b og 1c (med henholdsvis en volumenandel af tilslag på 0,7, 0,63 og 0,77) vist på samme måde som de var afbildet i figur 8.2, idet det antages, at cementpastaens og tilslagets elasticitetsmodul i disse betoner stemmer overens med det nævnte for 28-døgns elasticitetsmodulet.



Figur 10.4 – Elasticitetsmodul som funktion af tilslagets volumenandel estimeret via kompositmodeller under antagelse af, at cementpastaens 28-døgns elasticitetsmodul er $E_p = 15$ GPa, og tilslagets elasticitetsmodul er $E_t = 45$ GPa. Bemærk Hirsch og Counto model ligger så tæt på hinanden, at det ikke er muligt at skelne mellem de to modeller. Derudover er 2-, 7- og 28-døgns målinger for betoner med varierende tilslagsvolumen og konstant v/c=0,55 (1a, 1b, 1c) vist.

Selvom både 2-, 7- og 28-døgns målinger for betonerne 1a, 1b og 1c er vist i figur 10.4, skal det bemærkes, at kompositmodellerne kun skal sammenlignes med 28-døgns målingerne, da forudsætningerne for kompositmodellerne er baseret på dette.

Af figur 10.4 kan det ses, at 28-døgns målingerne ligger tæt på værdierne bestemt via Bache og Nepper-Christensen model - specielt målingerne for 1a og 1b, der giver stort set samme stigning i elasticitetsmodul ved en stigning af volumenandelen af tilslag fra 63% til 70%. Derudover ligger forsøgsresultaterne også ret tæt på værdierne beregnet vha. Hirsch og Counto model, som næsten giver sammenfaldende værdier. Som tidligere beskrevet giver Voigt og Reuss model grænseværdier, hvilket også ses af figur 10.4, hvor Voigt model giver en øvre værdi, og Reuss model giver en nedre grænse.

Dertil skal dog siges, at resultaterne beregnet via komposit
modellerne er meget følsomme over for de værdier, der er valgt af cement
pastaens og tilslagets elasticitetsmodul. Da der ikke er foretaget nog
en målinger, eller der ikke foreligger nogle oplysninger om disse værdier, er det svært at vurdere nøj
agtigheden af disse modeller. Cement
pastaens elasticitetsmodul er valgt til $\mathsf{E}_{\mathsf{p}}=15$ GPa, i
det der i afsnit 3.2 blev beskrevet, at cement
pastaens elasticitetsmodul er valgt til $\mathsf{E}_{\mathsf{t}}=45$ GPa, i
det der i (Herholdt et al., 1985, tab. 9.2) er beskrevet, at det vil ligge mellem 20 – 60 GPa.

I figur 10.5 er den minimale og maksimale værdi af elasticitetsmodulet beregnet via de fem komposit
modeller vist. For minimums værdien sættes $E_{\rm p}=10~{\rm GPa}$ og
 $E_{\rm t}=20~{\rm GPa}$, og for maksimums værdien sættes
 $E_{\rm p}=20~{\rm GPa}$ og $E_{\rm t}=60~{\rm GPa}.$



Figur 10.5 – Elasticitetsmodul som funktion af tilslagets volumenandel estimeret som maximums- og minimumsværdier via kompositmodeller under antagelse af, at cementpastaens elasticitetsmodul er $E_p^{min} = 10$ MPa og $E_p^{max} = 20$ MPa, og tilslagets elasticitetsmodul er $E_t^{min} = 20$ MPa og $E_t^{max} = 20$ MPa. Bemærk Hirsch og Counto model ligger så tæt på hinanden, at det ikke er muligt at skelne mellem de to modeller. Derudover er 2-, 7- og 28-døgns målinger for betoner med varierende tilslagsvolumen og konstant v/c=0,55 (1a, 1b, 1c) vist.

Af figur 10.5 ses det, at de målte værdier ligger stort set midt i intervallet bestemt vha. minimums og maksimums værdi af henholdsvis cementpastaens og tilslagets elasticitetsmodul. Da de nøjagtige værdier ikke kendes af cementpastaens og tilslagets elasticitetsmodul, er det umuligt at sige noget om hvilken eller hvilke af modellerne, der giver det bedste estimat af elasticitetsmodulet. Af tabel 10.1 kan det ses, at der generelt umiddelbart er en god overensstemmelse mellem det målt og estimerede via kompositmodellerne for betonerne støbt af forfatteren. Dog er det iøjnefaldende, at der for betonerne støbt af Unicon A/S er så stor afvigelse mellem det målte elasticitetsmodul og elasticitetsmodulerne estimerede via kompositmodellerne. Dette skyldes højst sandsynligt, at de valgte elasticitetsmoduler af cementpastaen og tilslagsmaterialet ikke stemmer overens med det korrekte.

I figur 10.6 er de estimerede elasticitetsmoduler bestemt via kompositmodellerne vist i relation til de målte elasticitetsmoduler. Derudover er tendenslinien til de forskellige data-sæt vist på trods af, at alle tendenslinierne har en lav regressionskoefficient omkring $R^2 = 0, 7$. Der kan altså ikke siges at være en lineær sammenhæng mellem værdierne, men tendenslinierne siger noget om tilbøjeligheden.



Figur 10.6 – Estimerede elasticitetsmoduler bestemt via kompositmodellerne vist i relation til de målte elasticitetsmoduler. Derudover er tendenslinien til de forskellige datas-æt vist.

Den mest optimale tendenslinie i figur 10.6 vil have en forskrift, der lyder: $E_{estimeret} = E_{målt}$. Dette er dog langt fra tilfældet; linierne skærer alle ordinaten mellem 18-20 og har en hældning på mellem 0,25-0,60. Der er altså umiddelbart noget, der tyder på, at kompositmodellerne ikke giver gode estimater af betons elasticitetsmodul.

Til sidst i tabel 10.1 er der vist et estimeret elasticitetsmodul bestemt via den empiriske model af (Takafumi et al., 2008) beskrevet i kapitel 4 og vist i formel 4.6. Denne model tager højde for hvilken type tilslagsmateriale og puzzolaner, der er i blandingen, gennem to konstanter. Udtrykket for elasticitetsmodulet afhænger ligeledes af både trykstyrken og densiteten. Sammenhængen mellem elasticitetsmodulet og trykstyrken er for samtlige målinger vist i figur 10.3, mens sammenhængen mellem elasticitetsmodulet og densiteten for samtlige målinger er vist i figur 10.7. I figuren er densiteten bestemt for hvert enkelt prøvelegeme, idet hvert prøvelegeme er målt og vejet i overensstemmelse med afsnit 6.4.1. Af figuren ses, at der, trods en rimelig stor spredning, er en tendens til, at elasticitetsmodulet stiger i takt med, at densiteten stiger. Dette skyldes formentligt at betons elasticitetsmodul, som tidligere nævnt, er afhængig af tilslagets elasticitetsmodul, der kan relateres til betonens densitet, idet elasticitetsmodulet af tilslagsmaterialet aftager ved aftagende densitet af materialet.



Figur 10.7 – Elasticitetsmodul som funktion af densiteten vist for samtlige forsøgsmålinger.

Idet den empiriske model afhænger af flere varierende parametre for de forskellige betoner, kan sammenhængen ikke illustreres via en enkelt kurve. I stedet er det maksimale og minimale elasticitetsmodul estimeret via det empiriske udtryk vist i figur 10.8 som funktion af trykstyrken, idet de maksimale og minimale værdier for konstanterne k_1 og k_2 samt for densiteten af prøvelegemerne er benyttet.



 $\label{eq:Figur 10.8} \begin{array}{l} - \ Elasticitets modul \ som \ funktion \ af \ trykstyrke \ vist \ for \ forsøgsresultaterne sammen \ med \ det \ maksimale \ og \ minimale \ elasticitets modul \ estimeret \ via \ det \ empiriske \ udtryk \ af \ (Takafumi \ et \ al., \ 2008), \ idet \ de \ maksimale \ og \ minimale \ værdier \ for \ konstanterne \ k_1 \ og \ k_2 \ samt \ for \ densiteten \ af \ prøvelegemerne \ er \ benyttet. \end{array}$

Af tabel 10.1 ses det, at den empiriske model giver et rimeligt godt estimat af elasticitetsmodulet for langt de fleste af betonerne - specielt for betonerne støbt af Unicon A/S. Faktisk er det den beregningsmodel, som giver det bedste estimat af elasticitetsmodulet for betonerne støbt af Unicon A/S. For kompositmodellerne virkede indholdet af puzzolaner som en svaghed, men det virker ikke umiddelbart som værende tilfældet for den empiriske model. Dog giver den empiriske model umiddelbart generelt dårligere estimat af elasticitetsmodulet i forhold til kompositmodellerne for betonerne støbt af forfatteren under forudsætning af de antagelser, der er opstillet i tabel 10.1. Dertil skal der siges, at de parametre, der indgår i kompositmodellerne (cementpastaens og tilslagets elasticitetsmodul), er skønnet og kan være skønnet helt forkert således, at de i virkeligheden vil give værdier med større afvigelser.

Generelt ses der af resultaterne i tabel 10.1 at der er en meget bedre sammenhæng mellem det målt og det estimerede via den empiriske model i forhold til, hvad der blev vist tidligere for kompositmodellerne. Dette understreges ligeledes i figur 10.9, hvor de estimerede elasticitetsmoduler bestemt via den empiriske model er vist i relation til de målte elasticitetsmoduler. Derudover er tendenslinien vist. Regressionskoefficient af tendenslinien er omkring $R^2 = 0, 8$ - altså meget lav, men alligevel noget højere end for tendenslinier vist i figur 10.6.



Figur 10.9 – Estimerede elasticitetsmoduler bestemt via den empiriske model vist i relation til de målte elasticitetsmoduler. Derudover er tendenslinien til data-sættet vist.

Tendenslinie i figur 10.6 er tæt på den mest optimale; forskriften for tendenslinien lyder: $E_{estimeret} = 0, 9 \cdot E_{målt}$. Umiddelbart giver den empiriske model generelt bedre estimater af betons elasticitetsmodul end kompositmodellerne. Den empiriske model er desuden langt nemmere at anvende i praksis, da denne kun kræver kendskab til betonens trykstyrke, densitet og sammensætning i modsætning til kompositmodellerne, der udover sammensætningen kræver kendskab til cementpastaens og tilslagets elasticitetsmodul.

Kapitel 11

Konklusion

Dette projekt tager udgangspunkt i, hvordan betons elasticitetsmodul og trykstyrke påvirkes af nogle udvalgte parametre af betonsammensætningen; de undersøgte parametres indflydelse er volumenandelen af tilslag, tilslagsmaterialets styrke, vand/cement-forholdet samt indhold af puzzolaner. Derudover evalueres forholdet mellem betons elasticitetsmodul og trykstyrke i projektet. I den sammenhæng er forskellige modeller, både teoretiske og praktiske, til estimering af elasticitetsmodulet blevet vurderet. I dette kapitel vil resultaterne fundet i projektet blive opsummeret, og overordnede konklusioner vil blive givet.

Projektet tager udgangspunkt i teoretiske og eksperimentelle undersøgelser. I det eksperimentelle studium er der lavet syv forskellige betonblandinger af forfatteren selv, hvoraf der er støbt $\emptyset 100 \times 200$ cylindre. Disse er brugt til at teste trykstyrke og elasticitetsmodul ved tre terminer; 2, 7 og 28 døgn. Tilsvarende er der støbt betoncylindre af tre blandinger, der er lavet af Unicon A/S. Disse cylindre er dog testet efter 1, 2, 3, 7, 28 og 56 døgn. De syv betoner blandet af forfatteren selv består af en reference beton (med middel volumenandel af tilslag, hvor tilslaget er søsten, og et middel v/c-forhold), to blandinger med henholdsvis lavere og højere volumenandel af tilslag, to blandinger med andre typer tilslagsmaterialer (knust granit og bauxit), og to blandinger med højere og lavere v/c-forhold. De tre betoner blandet af unicon A/S består af tre blandinger med tilnærmelsesvis tilsvarende sammensætning; dvs. volumenandelen af tilslag, typen af tilslagsmateriale, og det ækvivalente v/c-forhold er det samme. Forskellen på blandingerne er dog, at der i en blanding ikke er puzzolaner, mens der i de andre to blandinger er henholdsvis flyveaske og flyveaske samt mikrosilica.

Baseret på det eksperimentelle studium er indflydelsen på trykstyrken af volumenandel af tilslag, tilslagsmaterialets styrke, indhold af puzzolaner og v/c-forhold undersøgt. Det er fundet, at betons trykstyrke primært afhænger af cementpastaens styrke og sekundært af tilslagets form og ruhed. Af undersøgelserne kan følgende opsummeres:

1. Forøgelse i volumenandelen af tilslag har som ventet en lille og næsten ubetydelig indflydelse på trykstyrke. Der ses en lille stigning i trykstyrken, når volumenandel af tilslag stiger, men denne stigning kan siges at være tilfældig grundet usikkerheder, der er forbundet med blandingen og/eller forsøgsudførelsen.

- 2. Tilslagsmaterialets form og ruhed har stor indflydelse på trykstyrken; en ru og kantet overflade giver en højere trykstyrke.
- 3. v/c-forhold har betydelig indflydelse på trykstyrken; lavere v/c-forhold giver højere trykstyrke.
- 4. Indhold af mikrosilica har forholdsvis stor indflydelse på trykstyrken; mikrosilica giver en højere trykstyrke end estimeret.

Tilsvarende er indflydelsen af de varierede parametre på elasticitetsmodulet undersøgt, og følgende kan opsummeres:

- 1. Indflydelsen af volumenandelen af tilslag på elasticitetsmodulet er meget begrænset, idet en forøgelse i volumenandelen af tilslag giver en meget lille stigning i elasticitetsmodul.
- 2. Indflydelsen af det grove tilslags elasticitetsmodul på betonens elasticitetsmodul er markant. Betoner indeholdende tilslagsmaterialer med et højt elasticitetsmodul har et højt elasticitetsmodul, f.eks. gælder det for betoner indeholdende bauxit.
- 3. v/c-forholdet har betydelig indflydelse på elasticitets
modulet; lavere v/c-forhold giver højere elasticitets
modul.
- 4. Indhold af mikrosilica har stort set ingen indflydelse på elasticitetsmodulet.

Generelt er det fundet, at elasticitetsmodulet udvikles hurtigere end trykstyrken. Grunden til dette er, at betons trykstyrke hovedsageligt afhænger af cementpastaens egenskaber, der afhænger af terminen og cementpastaens sammensætning. Modsat afhænger betons elasticitetsmodul i særdeleshed af tilslagets elasticitetsmodul, der hverken afhænger af termin eller betonsammensætningen.

Baseret på de eksperimentelle resultater er forholdet mellem elasticitetsmodul og trykstyrke for betonerne evalueret. Derudover er det undersøgt, om udtrykkene i henholdsvis Eurocode 2 og det dansk nationale anneks til Eurocode 2 giver et godt estimat af elasticitetsmodulet ud fra trykstyrken for de testede betoner. Ligeledes vurderes fem kompositmodeller og en praktisk model, der er baseret på eksperimenter udført på et antal prøvelegemer udsat for aksial trykpåvirkning.

Det er fundet, at der ikke umiddelbart ud fra disse eksperimentelle målinger kan siges at være en entydig sammenhæng mellem betonernes trykstyrke og elasticitetsmodul. Udtrykkene i henholdsvis Eurocode 2 og det dansk nationale anneks til Eurocode 2 er ikke fundet at give gode estimater af elasticitetsmoduler for de testede betoner. Det er fundet, at der er en tendens til at overestimere elasticitetsmodulet via udtrykket i Eurocode 2, mens det modsatte er tilfældet, når udtrykket i det danske nationale anneks til Eurocode 2 benyttes. Derfor kan det ud fra dette eksperimentelle studium ikke forsvares at estimere betons elasticitetsmodul via udtrykket i Eurocode 2.

Kompositmodellerne, der er undersøgt, har en fysisk realitet, men ikke desto mindre fremstår kompositmodellerne alt for komplicerede at benytte i praksis, fordi betonens elasticitetsmodul er afhængig af flere parametre, som ikke alle er lige nemme at måle; elasticitetsmodulet af de forskellige faser (som udgangspunkt tilslaget og cementpastaen) og volumenandelen af tilslag. Som følge heraf kan sådanne modeller udelukkende benyttes til at evaluere effekten af betonens forskellige faser på betonens elasticitetsmodul.

Det er fundet, at den praktiske model foreslået af (Takafumi et al., 2008) estimerer betons elasticitetsmodul ganske godt, idet der tages højde for trykstyrken, densiteten, indholdet af puzzolaner og typen af grove tilslagsmaterialer.

Del I

Appendiks

Bilag A

Bestemmelse af bauxits densitet og absorption

Der er i en betonblanding lavet af forfatteren anvendt bauxit, men der har ikke været data tilgængelig omkring bauxittens densitet og absorption, derfor er disse bestemt eksperimentelt. For at bestemme bauxittens densitet skal vægten og rumfanget af en prøve bestemmes. Vægten er ligetil at bestemme, men bestemmelse af rumfanget kræver lidt flere anstrengelser. Princippet bag at bestemme rumfanget er at nedsænke en prøve i vand og derved afgøre prøvens volumen. Dette gøres, idet Archimedes lov siger, at når et legeme nedsænkes helt eller delvist i en væske, taber det lige så meget i vægt som den fortrængte væskemasse vejer. Dvs. vægten af den fortrængte vand bestemmes, hvilket nemt kan omregnes til et volumen, idet vands densitet er kendt til 1000 kg/m³.

Proceduren er som følger:

- 1. Udtag en repræsentativ prøve på ca. 200 g og sigt den på en 4 mm sigte for at udskille små korn.
- 2. Afvej en prøve på ca. 100 g ud af de 200 g noter den aktuelle prøves vægt, m_{akt} .
- 3. Anbring en lille glasskål i luftfrit vand ophængt i en analysevægt, se forsøgsopstilling på figur A.1.
- 4. Nulstil vægten.
- 5. Hæld forsigtigt hele prøven ned i glasskålen i vandet.
- 6. Lad prøven suge vand, aflæs vægten med passende mellemrum noter vægten, \mathfrak{m}_{vand} , når den er blevet konstant.
- 7. Tag prøven op og aftør kornene med et klæde indtil de bedømmes at være tørre på overfladen (men vandmættede) noter vægten, m_{ssd} .
- 8. Udtør prøven i en ovn ved 110°C til vægten er konstans noter vægten, m_d .



Figur A.1 – Principiel forsøgsopstilling til måling af bauxits densitet og absorption.

Resultaterne af forsøget kan ses i tabel A.1.

Masse af aktuel prøve, $\mathfrak{m}_{\mathfrak{akt}}$	$103,72~{\rm g}$
Masse af prøve nedsænket i vand, \mathfrak{m}_{vand}	$73,76~{ m g}$
Masse af vandmættet, overfladetør prøve, \mathfrak{m}_{ssd}	$105,\!39~{ m g}$
Masse af tør prøve, m_d	$103,\!55~{ m g}$

Tabel A.1 – Måleresultater til bestemmelse af bauxits densitet og absorption.

Ud fra disse resultater kan både det aktuelle vandindhold, densiteten og absorptionen bestemmes. Densiteten, γ_{bauxit} , bestemmes i formel A.1 og absorptionen, A, bestemmes i formel A.2.

$$\gamma_{\text{bauxit}} = \frac{m_{ssd}}{V} = \frac{m_{ssd}}{m_{ssd} - m_{vand}} = 3332 \text{ kg/m}^3 \tag{A.1}$$

$$A = \frac{m_{ssd} - m_d}{m_d} \cdot 100\% = 1,78\%$$
(A.2)

Disse resultater bruges, når recepten for beton indeholdende bauxit skal bestemmes, samt når betonen skal korrigeres for vandindhold i tilslagsmaterialet under blandingen. Det bør dog nævnes, at resultaterne for densitet og absorption er meget følsomme over for variationer. Ifølge (Herholdt et al., 1985, tab. 9.3) er densiteten af bauxit 3400 kg/m³, hvorfor forsøgsresultaterne vurderes sandsynlige og bruges ved fremstilling af beton indeholdende bauxit.

Bilag **B**

Kalibrering af trykprøvemaskine

Trykprøvemaskinen kan belaste med op til 3000 kN, maskinens viste værdi på displayet er dog kun kalibreret i forhold til den sande værdi i området over 50 kN. Det betyder, at når der belastes i området 0-50 kN, vides det ikke med sikkerhed, hvad den sande værdi er i forhold til den viste værdi. Derudover er det også nødvendigt at kende sammenhængen mellem den målte værdi og den sande værdi i forbindelse med måling af elasticitetsmodulet. I det følgende afsnit vil kalibreringen af trykprøvemaskinen blive beskrevet.

Trykprøvemaskinen kalibreres ved at relatere den sande værdi, som maskinen belaster med, med den målte værdi, der er det signal, der opsamles i output-filen. Den sande værdi findes ved at indsætte en lastcelle i prøvemaskinen, se test setup på figur B.1.



Figur B.1 – Kalibrerings setup.

Vist værdi	Målt værdi	Sand værdi	Afvigelse ml. målt	Afvigelse ml. vist
[kN]	[kN]	[kN]	og sand værdi $[\%]$	og sand værdi $[\%]$
$15,\!0$	15,0	$15,\!5$	3,3	3,3
20,0	19,7	19,9	$1,\!1$	$0,\!6$
$25,\!0$	24,4	$24,\!9$	1,9	0,5
30,0	29,3	$29,\!6$	$1,\!1$	1,3
$35,\!0$	34,4	34,7	1,0	0,9
40,0	39,0	39,5	1,2	$1,\!4$
45,0	44,1	44,6	1,3	0,8
50,0	49,1	49,5	0,9	1,0
100,0	98,0	100,1	2,1	-0,1
150,0	147,0	149,8	$1,\!9$	0,1
240,0	235,4	$239,\!6$	1,8	0,2
420,0	415,3	420,6	$1,\!3$	-0,1
600,0	$593,\!8$	600,6	1,2	-0,1
800,0	792,2	798,9	0,8	0,1
1000,0	991,5	998,5	0,7	0,2

Når lastcellen er indsat i maskinen, belastes der i intervallet 0-1000 kN i 15 step, hvor den viste værdi (aflæst manuelt), den målte værdi (opsamlet i dataloggeren) og den sande værdi (lastcellen) opsamles. Opsamlingsdataene kan ses i *(Kalibrering.xls)*, der kan findes på vedlagt appendiks-cd. Disse data er opsummeret i tabel B.1.

Tabel B.1 – Kalibreringsdata for et kalibreret område fra 0-1000 kN.

I tabel B.1 er afvigelsen mellem den målte og den sande værdi samt afvigelsen mellem den viste og sande værdi givet i procent. I figur B.2 er henholdsvis den viste og den målte værdi afbilledet grafisk i relation til den sande værdi. Det ses her, at der er en tydelig lineær sammenhæng mellem værdierne.



Figur B.2 – Relation mellem vist og sand værdi samt målt og sand værdi.

Sammenhængen vist i figur B.2 resulterer i kalibreringsfunktionerne vist i formel B.1 og B.2. Begge funktioner har en regressionskoefficient på $R^2 = 0,999$, hvilket betyder at målingerne ligger på en ret linie.

$$F_{\rm sand} = 1,0079 \cdot F_{\rm målt} + 0,6669 \tag{B.1}$$

$$F_{sand} = 0,9992 \cdot F_{vist} - 0,0786$$
 (B.2)

 hvor

F_{sand}	er den sande kraft [kN]
F _{målt}	er den målte kraft [kN]
F _{vist}	er den viste kraft [kN]

Bilag C

Prøvningsmetode - bestemmelse af elasticitetsmodul under trykpåvirkning

I (DS/EN 13412, 2006) er der angivet to metoder, der kan anvendes, når betons elasticitetsmodul skal bestemmes under trykpåvirkning. Metode 1 benyttes kort beskrevet for beton med høj krybnings karakteristika, og Metode 2 benyttes for beton med lav krybnings karakteristika. Det er udelukkende Metode 2, der benyttes til at bestemme elasticitetsmodulet af alle de forskellige betoner under trykpåvirkning. I det følgende vil proceduren ved brug af Metode 2 ifølge (DS/EN 13412, 2006) blive beskrevet i detaljer. Princippet bag testen er at måle sekantelasticitetsmodulet ved at påføre prøvelegemet en kontrolleret aksial tryklast og relatere spændingen med tøjningen.

Procedure - Metode 2

Ved Metode 2 bestemmes sekantværdien af elasticitetsmodulet ved at måle ændringen af tøjningen af prøvelegemet, når der belastes mellem en spænding på 0,5 N/mm², σ_2 , og en tredjedel af trykstyrken, f_c .

Proceduren beskrives detaljeret gennem de to følgende afsnit, hvor henholdsvis forbelastningen og testbelastningen beskrives.

Forbelastning

Prøvelegemet, med flytningsmåler påsat aksialt, placeres centralt i trykmaskinen. Påfør basis spændingen på 0,5 N/mm², σ_2 , og aflæs tøjningen. Øg spændingen i en jævn hastighed indenfor området 0,6±0,4 N/mm²/s indtil en tredjedel af trykstyrken, $\sigma_1 = f_c/3$, er nået.

Bevar belastningen i 60 s og aflæs tøjningen gennem de efterfølgende 30 s. Hvis den aflæste tøjning af prøvelegemet ikke er indenfor ± 10 % af middelværdien af tøjningen målt ved σ_1 , centreres prøvelegemet igen i maskinen og forbelastningen gentages.

Hvis det ikke er muligt at reducere forskellen til ± 10 % af middelværdien af tøjningen målt ved σ_1 , fortsættes der ikke til testbelastningen - prøvelegemet kasseres i stedet.

Udfør mindst to yderligere forbelastningscyklusser ved brug af samme hastighed ved op- og nedlastning, og bevar spændingerne (σ_1 og σ_2) konstant i 60 s.

Testbelastning

Når den sidste forbelasningscyklus er gennemført, måles ændringen i tryktøjningen, $\Delta \varepsilon$, idet spændingen øges fra σ_2 til σ_1 ; beregn $\Delta \sigma$ som differensen mellem de to spændinger (dvs. $\Delta \sigma = \sigma_1 - \sigma_2$). Målinger af σ_1 og $\Delta \varepsilon$ skal gennemføres indenfor 30 s.

Når alle målinger er gennemført, fjernes flytningsmålerne. Derefter øges belastningen på prøvelegemet med den specificerede hastighed indtil, der opstå brud, og herefter beregnes brudspændingen, σ_f . Hvis trykstyrken σ_f afviger mere ende 20 % fra f_c , skal det noteres i testrapporten.

Sekantværdien af elasticitetsmodulet beregnes af hvert prøvelegeme ved at addere $\Delta \sigma$ med $\Delta \varepsilon$. Beregn middelværdien af sekantværdien af elasticitetsmodulet for de tre prøvelegemer og afrund middelværdien til nærmeste 100 N/mm².

Bilag **D**

Statistisk behandling af forsøgsresultater

Som grundlag for vurdering af forsøgsresultaterne er middelværdien, spredningen og variationskoefficienten bestemt for hver termin for både trykstyrken og elasticitetsmodulet.

Middelværdien, \overline{X} , bestemmes som vist i formel D.1. (Ayyub and McCuen, 1997, formel 2-4)

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i \tag{D.1}$$

Spredning, S, bestemmes via udtrykket vist i formel D.2. (Ayyub and McCuen, 1997, formel 2-7)

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{X})^2}$$
(D.2)

Variationskoefficienten, COV, bestemmes herefter ved formel D.3. (Ayyub and McCuen, 1997, formel 2-10)

$$COV = \frac{S}{\bar{X}}$$
(D.3)

Bilag **E**

Forsøgsresultater: Trykstyrke

Betonernes trykstyrke er i dette appendiks angivet. Data-filerne, indeholdende last i kN og tøjning i procent, kan findes i mappen (data) på den vedlagt appendiks-cd. Derudover kan (main.m) findes på vedlagt appendiks-cd, der er en fil, hvor dataene bliver håndteret og plottet.

Måleresultaterne af trykstyrken for hver betontype er i dette appendiks vist grafisk som funktion af modenheden såvel som i en tabel. I tabellerne er alle målinger af trykstyrken angivet. På figurerne er målingerne vist med en sort stjerne, mens de gennemsnitlige værdier er angivet med en rød stjerne, der samtidig er forbundet med en linie.

For betonblandingerne, der er støbt af Unicon A/S (U1, U2, U3, U4), er egenskabsmodellen for betontypen desuden vist. Det er kun for disse betontype, egenskabsmodellerne er angivet, da de andre betontyper har for få målinger at basere modellen på. Egenskabsmodellerne er bestemt grafisk i overensstemmelse med appendiks G. Desuden er der for disse betontyper også angivet middelværdien af de trykstyrker, som Unicon A/S har målt. Disse trykstyrker er målt på $Ø150 \times 300$ cylindre, hvorfor betydning, af at måle trykstyrken på $Ø100 \times 200$ cylindre eller $Ø150 \times 300$ cylindre, er diskuteret i kapitel 9.



1a (n=0,70, søsten, v/c=0,55)

Figur E.1 – Trykstyrke som funktion af modenhed for beton 1a.

Nr.	Alder	f _c	$f_{c, middel}$	S	COV
	[døgn]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]
$1a_{001}$	2	21,4			
$1a_{002}$	2	$21,\!3$	21,4	0,1	0,6
$1a_{003}$	2	$21,\!6$			
1a_001	7	32,1			
$1a_{002}$	7	$_{30,7}$	31,7	0,8	2,7
$1a_{003}$	7	32,2			
1a_001	28	41,2			
$1a_{002}$	28	40,6	41,3	0,8	1,9
$1a_{003}$	28	42,1			

Tabel E.1 – Forsøgsresultater af trykstyrke for 1a.

1b (n=0,63)



Figur E.2 – Trykstyrke som funktion af modenhed for beton 1b.

Nr.	Alder	f _c	$f_{c, middel}$	S	COV
	[døgn]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]
$1b_{001}$	2	20,6			
$1b_{002}$	2	19,8	20,0	$0,\!6$	2,8
$1b_{003}$	2	$19,\! 6$			
$1b_{001}$	7	33,2			
$1b_{002}$	7	$_{30,1}$	$31,\!6$	$1,\!6$	5,0
$1b_{003}$	7	31,5			
$1b_{001}$	28	40,2			
$1b_{002}$	28	42,1	41,3	$1,\!0$	2,4
$1b_{003}$	28	41,5			

Tabel E.2 – Forsøgsresultater af trykstyrke for 1b.

1c (n=0,77)



Figur E.3 – Trykstyrke som funktion af modenhed for beton 1c.

Nr.	Alder	f _c	$f_{c, middel}$	S	COV
	[døgn]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]
1c_001	2	23,9			
$1c_{002}$	2	26,0	24,9	$1,\!0$	4,1
$1c_{003}$	2	$24,\!8$			
1c_001	7	33,2			
$1c_{002}$	7	$34,\!6$	$34,\! 6$	$1,\!4$	4,0
$1c_{003}$	7	36,0			
1c_001	28	42,7			
$1c_{002}$	28	42,7	42,9	0,2	0,5
$1c_{003}$	28	43,1			

Tabel E.3 – Forsøgsresultater af trykstyrke for 1c.

2b (Granit)



Figur E.4 – Trykstyrke som funktion af modenhed for beton 2b.

Nr.	Alder	f _c	$f_{c, middel}$	S	COV
	[døgn]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]
$2b_{001}$	2	25,3			
$2b_{002}$	2	25,7	$25,\!6$	$_{0,2}$	0,9
$2b_{003}$	2	$25,\!8$			
$2b_{001}$	7	39,0			
$2b_{002}$	7	$39,\! 6$	$39,\! 6$	$0,\!6$	1,6
$2b_{003}$	7	40,3			
$2b_{001}$	28	41,1			
$2b_{002}$	28	49,5	47,3	5,5	$11,\!6$
$2b_{003}$	28	51,4			

Tabel E.4 – Forsøgsresultater af trykstyrke for 2b.

2c (Bauxit)



Figur E.5 – Trykstyrke som funktion af modenhed for beton 2c.

Nr.	Alder	f _c	$f_{c, middel}$	S	COV
	[døgn]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]
$2c_{001}$	2	$26,\!6$			
$2c_{002}$	2	29,0	$27,\!6$	$1,\!3$	4,5
$2c_{003}$	2	$27,\!3$			
$2c_{001}$	7	40,2			
$2c_{002}$	7	41,2	41,0	0,8	$1,\!9$
$1a_{003}$	7	41,7			
$2c_{001}$	28	$53,\!0$			
$2c_{002}$	28	54,1	$53,\!3$	$0,\!6$	1,2
$2c_{003}$	28	$52,\!9$			

Tabel E.5 – Forsøgsresultater af trykstyrke for 2c.
3b (v/c=0,70)



Figur E.6 – Trykstyrke som funktion af modenhed for beton 3b.

Nr.	Alder	f _c	$f_{c, middel}$	S	COV
	[døgn]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]
$3b_{001}$	2	12,4			
$3b_{002}$	2	$12,\!6$	12,2	0,5	4,2
$3b_{003}$	2	$11,\!6$			
$3b_{001}$	7	19,1			
$3b_{002}$	7	19,5	19,4	$0,\!2$	1,0
$3b_{003}$	7	19,4			
$3b_{001}$	28	31,1			
$3b_{002}$	28	29,5	29,9	$1,\!0$	3,5
$3b_{003}$	28	29,1			

Tabel E.6 – Forsøgsresultater af trykstyrke for 3b.

3c (v/c=0,40)



Figur E.7 – Trykstyrke som funktion af modenhed for beton 3c.

Nr.	Alder	f _c	$f_{c, middel}$	S	COV
	[døgn]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]
3c_001	2	37,4			
$3c_{002}$	2	37,0	$37,\!8$	$1,\!0$	2,7
$3c_{003}$	2	38,9			
3c_001	7	54,8			
$3c_{002}$	7	54,1	$54,\!4$	$0,\!4$	0,7
$3c_{003}$	7	$54,\!4$			
3c_001	28	$63,\!5$			
$3c_{002}$	28	67,4	65,3	2,0	3,0
$3c_{003}$	28	65,1			

Tabel E.7 – Forsøgsresultater af trykstyrke for 3c.



Figur E.8 – Trykstyrke som funktion af modenhed for beton U1.

Nr.	Alder	f _c	$f_{c, middel}$	S	COV	$f_{c,middel}^{Unicon}$
	[døgn]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]
U1_001	1	7,8				
U1_002	1	7,5	7,7	0,1	1,5	5,8
U1_003	1	7,7				
U1_001	2	17,2				
U1_002	2	17,1	17,0	0,3	1,9	15,7
U1_003	2	16,6				
U1_001	3	20,5				
U1_002	3	20,9	21,1	0,8	3,6	20,8
U1_003	3	21,9				
U1_001	7	27,4				
U1_002	7	27,6	$27,\!6$	0,2	0,6	26,8
U1_003	7	27,7				
U1_001	28	37,0				
U1_002	28	36,6	37,1	0,5	1,4	36,4
U1_003	28	37,6				
U1_001	56	40,7				
U1_002	56	40,7	40,9	0,4	0,9	39,0
U1_003	56	41,3				

Tabel E.8 – Forsøgsresultater af trykstyrke for U1.

 $\mathbf{U1}$

U2 (MS, flyveaske)



Figur E.9 – Trykstyrke som funktion af modenhed for beton U2.

Nr.	Alder	f _c	f _{c,middel}	S	COV	$f_{c,middel}^{Unicon}$
	[døgn]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]
$U2_{001}$	1	6,6				
$U2_{002}$	1	6,5	6,5	$_{0,1}$	$1,\!3$	5,4
$U2_003$	1	6,5				
$U2_{001}$	2	14,4				
$U2_{002}$	2	14,8	14,7	$0,\!2$	$1,\!6$	$13,\!3$
$U2_{003}$	2	14,9				
U2_001	3	21,9				
$U2_{002}$	3	22,0	21,9	$_{0,1}$	0,5	$19,\!9$
$U2_003$	3	21,8				
U2_001	7	28,8				
$U2_{002}$	7	28,7	$28,\! 6$	$0,\!2$	$0,\!6$	28,1
$U2_{003}$	7	28,4				
$U2_{001}$	28	37,8				
$U2_{002}$	28	38,8	$38,\!8$	$1,\!0$	2,5	39,5
$U2_{003}$	28	39,7				
U2_001	56	44,9				
$U2_{002}$	56	44,9	44,7	0,4	0,8	42,6
$U2_{003}$	56	44,3				

Tabel E.9 – Forsøgsresultater af trykstyrke for U2.

70 · Alle målinger 0,5 $\frac{4,8}{M}$ 48,9exp f_c • Middelværdi 60 Lineær model **Eksponentiel model** Trykstyrke, fc [GPa] 10 8.1 0.5 5 10 1 50 Alder [døgn]

U3 (flyveaske)

Figur E.10 – Trykstyrke som funktion af modenhed for beton U3.

Nr.	Alder	f _c	$f_{c,\rm middel}$	S	COV	$f_{c, \mathrm{middel}}^{\mathrm{Unicon}}$
	[døgn]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]
U3_001	1	3,7				
U3_002	1	$_{3,9}$	3,8	0,1	3,4	3,6
U3_003	1	$_{3,8}$				
$U3_{001}$	2	10,2				
U3_002	2	10,0	10,2	0,4	3,7	8,2
U3_003	2	10,7				
U3_001	3	14,0				
U3_002	3	14,1	14,0	0,1	0,8	$13,\!8$
$U3_{003}$	3	$13,\!9$				
U3_001	7	21,5				
U3_002	7	21,0	21,4	0,4	1,8	21,5
U3_003	7	$21,\!8$				
U3_001	28	$_{30,7}$				
U3_002	28	$_{30,6}$	30,7	0,1	0,4	$_{30,5}$
U3_003	28	30,9				
U3_001	56	36,1				
U3_002	56	$36,\!6$	37,0	1,1	2,9	36,4
U3_003	56	38,2				

Tabel E.10 – Forsøgsresultater af trykstyrke for U3.

U4 (SP)



Figur E.11 – Trykstyrke som funktion af modenhed for beton U4.

Nr.	Alder	f _c	$f_{c,\mathrm{middel}}$	S	COV	$f_{c,\mathrm{middel}}^{\mathrm{Unicon}}$
	[døgn]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]
$U4_{001}$	1	15,2				
$U4_{002}$	1	14,2	$14,\!5$	$0,\!5$	3,6	$14,\!3$
$U4_003$	1	14,3				
U4_001	2	27,8				
$U4_{002}$	2	27,4	27,7	$0,\!3$	1,1	$24,\! 6$
$U4_{003}$	2	28,0				
$U4_{001}$	3	33,0				
$U4_{002}$	3	27,8	31,0	2,8	9,1	$31,\!8$
$U4_{003}$	3	32,3				
$U4_{001}$	7	43,1				
$U4_{002}$	7	43,4	42,7	$1,\!0$	2,4	43,1
$U4_{003}$	7	41,5				
$U4_{001}$	28	$51,\!8$				
$U4_{002}$	28	50,9	52,0	$1,\!2$	2,4	$50,\!8$
$U4_{003}$	28	$53,\!3$				
U4_001	56	54,9				
$U4_{002}$	56	$55,\!5$	55,1	$0,\!3$	$0,\!6$	52,2
$U4_{003}$	56	$54,\!8$				

Tabel E.11 – Forsøgsresultater af trykstyrke for U4.

Bilag **F**

Forsøgsresultater: Elasticitetsmodul

Betonernes elasticitetsmodul er i dette appendiks angivet. Data-filerne, indeholdende last i kN og tøjning i procent, kan findes i mappen (data) på den vedlagt appendiks-cd. Derudover kan (main.m) findes på vedlagt appendiks-cd, der er en fil, hvor dataene bliver håndteret og plottet.

Måleresultaterne af elasticitetsmodulet for hver betontype er i dette appendiks vist grafisk som funktion af modenheden såvel som i en tabel. I tabellerne er alle målinger af elasticitetsmodulet angivet. På figurerne er målingerne vist med en sort stjerne, mens de gennemsnitlige værdier er angivet med en rød stjerne, der samtidig er forbundet med en linie. For betonblandingerne, der er støbt af Unicon A/S (U1, U2, U3, U4), er egenskabsmodellen for betontypen desuden vist. Det er kun for disse betontype, egenskabsmodellerne er angivet, da de andre betontyper har for få målinger at basere modellen på. Egenskabsmodellerne er bestemt grafisk i overensstemmelse med appendiks G.



Figur F.1 – Elasticitetsmodul som funktion af modenhed for beton 1a.

Nr.	Alder	E	E_{middel}	S	COV
	[døgn]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]
1a_001	2	26,2			
$1a_{002}$	2	26,0	26,3	$0,\!4$	1,4
$1a_{003}$	2	26,7			
$1a_{001}$	7	29,3			
$1a_{002}$	7	29,2	29,2	0,1	0,2
$1a_{003}$	7	29,2			
1a_001	28	31,7			
$1a_{002}$	28	$32,\!6$	32,5	0,7	2,1
$1a_{003}$	28	33,1			

Tabel F.1 – Forsøgsresultater af trykstyrke for 1a.

1a (n=0,70, søsten, v/c=0,55)

1b (n=0,63)



Figur F.2 – Elasticitetsmodul som funktion af modenhed for beton 1b.

Nr.	Alder	E	E_{middel}	S	COV
	[døgn]	[GPa]	[GPa]	[GPa]	[%]
$1b_{001}$	2	$23,\!9$			
$1b_{002}$	2	24,2	24,2	$0,\!2$	1,0
$1b_{003}$	2	$24,\!4$			
$1b_{001}$	7	28,4			
$1b_{002}$	7	25,7	27,5	$1,\!6$	5,6
$1b_{003}$	7	28,5			
$1b_{001}$	28	$_{30,3}$			
$1b_{002}$	28	$_{30,5}$	$_{30,3}$	$0,\!2$	0,5
$1b_{003}$	28	$_{30,2}$			

Tabel F.2 – Forsøgsresultater af trykstyrke for 1b.

1c (n=0,77)



Figur F.3 – Elasticitetsmodul som funktion af modenhed for beton 1c.

Nr.	Alder	E	E_{middel}	S	COV
	[døgn]	[GPa]	[GPa]	[GPa]	[%]
1c_001	2	25,2			
1c_002	2	29,2	27,1	2,0	7,4
$1c_{003}$	2	26,9			
1c_001	7	29,5			
1c_002	7	29,3	$_{30,4}$	$1,\!6$	5,3
1c_003	7	32,2			
1c_001	28	32,3			
1c_002	28	33,0	$32,\!8$	$0,\!5$	1,5
$1c_{003}$	28	33,1			

Tabel F.3 – Forsøgsresultater af trykstyrke for 1c.

2b (Granit)



Figur F.4 – Elasticitetsmodul som funktion af modenhed for beton 2b.

Nr.	Alder	E	E_{middel}	S	COV
	[døgn]	[GPa]	[GPa]	[GPa]	[%]
$2b_{001}$	2	25,1			
$2b_{002}$	2	$25,\!8$	25,2	$0,\!5$	2,2
$2b_{003}$	2	24,7			
$2b_{001}$	7	30,7			
$2b_{002}$	7	28,9	$29,\! 6$	0,9	3,1
$2b_{003}$	7	29,3			
$2b_{001}$	28	$32,\!6$			
$2b_{002}$	28	34,1	33,2	0,8	2,3
$2b_{003}$	28	33,0			

Tabel F.4 – Forsøgsresultater af trykstyrke for 2b.



Figur F.5 – Elasticitetsmodul som funktion af modenhed for beton 2c.

Nr.	Alder	E	E_{middel}	S	COV
	[døgn]	[GPa]	[GPa]	[GPa]	[%]
2c_001	2	33,8			
$2c_{002}$	2	38,7	$_{36,2}$	2,4	6,7
$2c_{003}$	2	36,0			
2c_001	7	40,9			
$2c_{002}$	7	42,9	44,0	3,8	8,6
$2c_{003}$	7	48,2			
2c_001	28	45,3			
2c_002	28	44,4	45,2	0,8	1,7
$2c_{003}$	28	$45,\!9$			

Tabel F.5 – Forsøgsresultater af trykstyrke for 2c.

2c (Bauxit)

3b (v/c=0,70)



Figur F.6 – Elasticitetsmodul som funktion af modenhed for beton 3b.

Nr.	Alder	E	E_{middel}	S	COV
	[døgn]	[GPa]	[GPa]	[GPa]	[%]
$3b_{001}$	2	$21,\!6$			
$3b_{002}$	2	22,1	21,1	1,3	6,3
$3b_{003}$	2	$19,\! 6$			
$3b_{001}$	7	24,7			
$3b_{002}$	7	26,1	$25,\!8$	$1,\!1$	4,3
$3b_{003}$	7	26,8			
$3b_{001}$	28	28,4			
$3b_{002}$	28	29,7	$28,\!8$	0,8	2,8
$3b_{003}$	28	28,2			

Tabel F.6 – Forsøgsresultater af trykstyrke for 3b.

Figur F.7 – Elasticitetsmodul som funktion af modenhed for beton 3c.

Nr.	Alder	E	E_{middel}	S	COV
	[døgn]	[GPa]	[GPa]	[GPa]	[%]
3c_001	2	32,6			
$3c_{002}$	2	$32,\!6$	32,0	1,2	3,6
$3c_{003}$	2	$30,\!6$			
3c_001	7	35,3			
$3c_{002}$	7	37,5	36,0	1,3	3,6
$3c_{003}$	7	35,1			
3c_001	28	$36,\!8$			
3c_002	28	37,0	37,0	$_{0,2}$	$0,\!6$
$3c_{003}$	28	37,2			

Tabel F.7 – Forsøgsresultater af trykstyrke for 3c.

3c (v/c=0,40)



Figur F.8 – Elasticitetsmodul som funktion af modenhed for beton U1.

Nr.	Alder	E	E_{middel}	S	COV	
	[døgn]	[GPa]	[GPa]	[GPa]	[%]	
$U1_{001}$	1	17,5		0,2	1,0	
$U1_{002}$	1	$17,\!4$	$17,\!3$			
$U1_{003}$	1	17,1				
$U1_{001}$	2	24,5		0,8	3,0	
$U1_{002}$	2	25,0	25,2			
$U1_{003}$	2	26,0				
$U1_{001}$	3	$27,\!6$				
$U1_{002}$	3	26,0	26,9	$0,\!8$	3,1	
$U1_{003}$	3	27,1				
$U1_{001}$	7	$_{30,3}$		29,4	4,3	
$U1_{002}$	7	28,0	29,4			
$U1_{003}$	7	$_{30,0}$				
$U1_{001}$	28	32,0				
$U1_{002}$	28	32,7	32,0	0,7	2,1	
$U1_{003}$	28	$31,\!3$				
$U1_{001}$	56	34,6				
$U1_{002}$	56	$32,\!9$	34,1	$1,\!0$	2,9	
$U1_003$	56	$34,\! 6$				

Tabel F.8 – Forsøgsresultater af trykstyrke for U1.

U2 (MS, flyveaske)



Figur F.9 – Elasticitetsmodul som funktion af modenhed for beton U2.

Nr.	Alder	E	E_{middel}	S	COV	
	[døgn]	[GPa]	[GPa]	[GPa]	[%]	
U2_001	1	10,6		0,7	6,2	
$U2_{002}$	1	11,7	11,4			
$U2_{003}$	1	12,0				
$U2_{001}$	2	17,9		0,6	3,4	
$U2_{002}$	2	18,2	18,4			
$U2_{003}$	2	19,1				
$U2_{001}$	3	20,8				
$U2_{002}$	3	20,5	20,7	0,2	1,0	
$U2_{003}$	3	20,9				
$U2_{001}$	7	21,4		0,2	1,1	
$U2_{002}$	7	21,7	21,7			
$U2_{003}$	7	21,9				
U2_001	28	24,6				
$U2_{002}$	28	24,7	24,6	0,1	$0,\!4$	
$U2_{003}$	28	24,5				
U2_001	56	24,0				
$U2_{002}$	56	26,7	25,9	0,9	3,5	
$U2_{003}$	56	26,0				

Tabel F.9 – Forsøgsresultater af trykstyrke for U2.

U3 (flyveaske)



Figur F.10 – Elasticitetsmodul som funktion af modenhed for beton U3.

Nr.	Alder	E	E_{middel}	S	COV	
	[døgn]	[GPa]	[GPa]	[GPa]	[%]	
U3_001	1	5,1		0,5	8,2	
$U3_{002}$	1	6,1	5,6			
$U3_{003}$	1	5,7				
U3_001	2	14,9		1,5	9,0	
$U3_{002}$	2	16,2	16,3			
$U3_{003}$	2	$17,\!8$				
$U3_{001}$	3	16,7				
$U3_{002}$	3	$17,\!8$	$17,\!4$	0,6	3,3	
$U3_{003}$	3	17,7				
$U3_{001}$	7	20,5		0,7	3,3	
$U3_{002}$	7	$21,\!5$	$21,\!3$			
$U3_{003}$	7	$21,\!9$				
$U3_{001}$	28	22,7				
$U3_{002}$	28	$22,\!8$	22,7	0,2	0,7	
$U3_{003}$	28	$22,\!5$				
U3_001	56	25,1				
$U3_{002}$	56	$24,\!3$	24,9	$0,\!6$	2,3	
$U3_{003}$	56	$25,\!4$				

Tabel F.10 – Forsøgsresultater af trykstyrke for U3.

HWP

U4 (SP)



Figur F.11 – Elasticitetsmodul som funktion af modenhed for beton U4.

Nr.	Alder	E	E_{middel}	S	COV	
	[døgn]	[GPa]	[GPa]	[GPa]	[%]	
U4_001	1	20,4		1,0	5,1	
$U4_{002}$	1	18,5	$19,\! 6$			
$U4_{003}$	1	$19,\!9$				
U4_001	2	23,0		0,2	0,9	
$U4_{002}$	2	23,4	23,1			
$U4_{003}$	2	$23,\!3$				
U4_001	3	23,4		0,7	2,8	
$U4_{002}$	3	24,1	24,1			
$U4_{003}$	3	24,8				
U4_001	7	27,8		0,2	0,8	
$U4_{002}$	7	28,2	28,0			
$U4_{003}$	7	28,1				
U4_001	28	28,7				
$U4_{002}$	28	28,3	28,8	$0,\!6$	2,3	
$U4_{003}$	28	$29,\!6$				
U4_001	56	31,2				
$U4_{002}$	56	$_{30,4}$	31,0	$0,\!5$	1,7	
$U4_{003}$	56	31,4				

Tabel F.11 – Forsøgsresultater af trykstyrke for U4.

Bilag G

Egenskabsudvikling

Til beskrivelse af egenskabsudviklingen af betonerne opstilles en egenskabsmodel, der kan være enten en lineær, se formel G.1, eller en eksponentiel model, se formel G.2.

$$\frac{y}{y_0} = \ln\left(\frac{M}{\tau_0}\right) \tag{G.1}$$

$$\frac{y}{y_{\infty}} = \exp\left(-\left(\frac{\tau_e}{M}\right)^{\alpha_e}\right) \tag{G.2}$$

hvor

- y er den betragtede egenskab (f_c [MPa] eller E [GPa])
- y_0 er egenskaben ved $M = exp(1) \cdot \tau_0$ [døgn]

 y_{∞} er den opnåelig egenskab, såfremt hærdetiden går mod uendelig (f_c [MPa] eller E [GPa])

M er modenhed [døgn]

 τ_0 er modenhed hvor egenskabsudviklingen synligt ekspandere [døgn]

 τ_e er en karakteristisk tidskonstant [døgn]

 α_e er krumningsparameteren [-]

Bestemmelsen af parametrene, der indgår i formel G.1 og G.2, forløber efter følgende opskrift:

- 1. Bestem y_0 og τ_0 grafisk.
- 2. Bestem α_e ved anvendelse af diagram for egenskabsudvikling.
- 3. Beregn y_{∞} og τ_e via $y_{\infty} = exp(1) \cdot \frac{y_0}{\alpha_e}$ og $\tau_e = \tau_0 \cdot exp(\frac{1}{\alpha_e})$.

De analytiske udtryk givet i formel G.1 og G.2 har vist sig at være særligt egnede til beskrivelse af betonens tidsmæssige udvikling af netop styrken og stivheden. Det bør dog nævnes, at de analytiske udtryk ikke skal opfattes som reaktionskinetiske modeller for de komplicerede hydratiseringsprocesser, der sker under betonens afbinding og hærdning, men som en beskrivelse af de fysiske størrelser i relation til tiden. Den praktiske fremstilling af en egenskabsmodel er i det følgende illustreret for udvikling af trykstyrke for betontype U1.

Der er gennemført en laboratorieundersøgelse af betons styrke- og stivhedsudvikling. Der er testet tre cylindre pr. termin og resultaterne af testen er:

M =	1,1	2,1	3,1	7,1	28,0	56,0	døgn
$f_c =$	7,7	$17,\! 0$	21,1	$27,\!6$	37,1	40,9	MPa
E =	17,3	25,2	26,9	29,4	32,0	34,1	GPa

Af måleresultaterne fremgår det, at betonens trykstyrke, f_c , og elasticitetsmodul, E, afhænger af hærdetiden, M. Egenskabsmodellen antages eksponentiel for både beskrivelsen af trykstyrken og stivheden. I den generelle model, formel G.2, indsættes $y = f_c$ og y = E, hvilket kan ses i henholdsvis formel G.3 og G.4.

$$f_{c} = f_{c\infty} exp\left(-\left(\frac{\tau_{e}}{M}\right)^{\alpha_{e}}\right)$$
(G.3)

$$\mathsf{E} = \mathsf{E}_{\infty} \exp\left(-\left(\frac{\tau_e}{M}\right)^{\alpha_e}\right) \tag{G.4}$$

Bestemmelsen af parametrene, der indgår i udtrykkene, er gennemgået i det følgende. Måleresultaterne er i figur G.1 indtegnet i et semilogaritmisk diagram, hvor der samtidig er indtegnet en linje, således der opnås det bedste mulige fit.



Figur G.1 – Måleresultater af trykstyrke, f_c, som funktion af hærdetiden vist med røde prikker. Lineær model indlagt således det bedste mulige fit opnåes.

Af figur G.1 bestemmes hjælpestørrelserne τ_0 =0,6 døgn og f_{c0} = 13 MPa. τ_0 bestemmes som skæringen mellem linjen og x-aksen, mens f_{c0} bestemmes som linjens ordinat til $\tau = exp(1) \cdot \tau_0 = 1,6310$ døgn.

Via hjælpestørrelserne og et udvalgt datasæt bestemmes krumningsparameteren α_e via aflæsning på diagram for egenskabsudvikling - α_e aflæses til 0,85. Diagrammet kan ses i (Egenskabsudvikling.pdf) på den vedlagte appendiks-cd.

Til sidst bestemmes $f_{c\infty}$ og τ_e som tidligere angivet. Det findes at $f_{c\infty} = exp(1) \cdot \frac{f_{c0}}{\alpha_e} = 41, 6$ MPa og $\tau_e = \tau_0 \cdot exp(\frac{1}{\alpha_e}) = 1, 9$ døgn.

Denne gennemgang betyder, at det analytiske udtryk for beskrivelsen af betonens trykstyrkeudvikling antager formen som vist i formel G.5.

$$f_{c} = 41, 6 \exp\left(-\left(\frac{1,9}{M}\right)^{0,85}\right)$$
(G.5)

Denne udvikling er illustreret i figur G.2.



Figur G.2 – Måleresultater af trykstyrke, f_c, som funktion af hærdetiden vist med røde prikker. Linje angiver den eksponentielle egenskabsmodellen til beskrivelse af trykstyrkeudviklingen.

På tilsvarende måde er parametrene til egenskabsmodellen for beskrivelse af elasticitetsmodulets udvikling bestemt; udtrykket er givet i formel G.6.

$$E = 34,0exp\left(-\left(\frac{0,7}{M}\right)^{0,8}\right)$$
(G.6)

Litteratur

- Ayyub, B. M., McCuen, R. H., 1997. Probability, Statistics, and Reliability for Engineers and Scientists. Chapman & Hall/CRC.
- Baalbaki, W., Aïtcin, P.-C., Ballivy, G., 1992. On Predicting Modulus of Elasticity in High-Strength Concrete. ACI Materials Journal. Title no. 89-M56 pp. 517-520.
- DS/EN 12390-1, 2002. Prøvning af hærdet beton Del 1: Form, dimensioner og andre krav til prøvelegemer og forme. Dansk Standard, 2. udgave.
- DS/EN 12390-2, 2002. Prøvning af hærdet beton Del 2: Tilvirkning og legring af prøvelegemer for styrkeprøvning. Dansk Standard, 2. udgave.
- DS/EN 12390-3, 2002. Prøvning af hærdet beton Del 3: Trykstyrke. Dansk Standard, 1. udgave.
- DS/EN 13412, 2006. Produkter og systemer til bestemmelse og reparation af betonkonstruktioner -Prøvningsmetoder - Bestemmelse af elasticitetsmodul under trykpåvirkning. Dansk Standard, 1. udgave.
- DS/EN 1992-1-1, 2008. Eurocode 2: Betonkonstruktioner Del 1-1: Generelle regler samt regler for bygningskonstruktioner. Dansk Standard, 3. udgave.
- EN 1992-1-1 DK NA, 2007. Nationalt Anneks til Eurocode 2: Betonkonstruktioner Del 1-1: Generelle regler samt regler for bygningskonstruktioner. 2. udgave.
- Herholdt, A. D., Justesen, C. F. P., Nepper-Christensen, P., Nielsen, A., 1985. Beton-Bogen. Aalborg Portland, 2. udgave.
- Johansen, J. S., Høgh, A. K., 2007. Lavstyrke SCC med kalkfiller. Aalborg Universitet.
- Kockal, N. U., Ozturan, T., 2010. Strength and elastic properties of structural lightweight concretes. Materials and Design 32 (2011), pp. 2396-2403. Elsevier.
- Kristensen, L. F., Skúlason, M., 2006. Søsten versus knust granit i selvkompakterende betoner i aggressive miljøer. Aalborg Universitet.
- Lydon, F. D., Balendran, R. V., 1986. Some observations on elastic properties of plain concrete. Cement and Concrete Research. Vol. 16, pp. 314-324. Pergamon Press Ltd.
- Nepper-Christensen, P., 1970. Betons elasticitetsmodul. Beton Teknik. Aalborg Portland.
- Nilsen, A. U., Monterio, P. J. M., 1992. Concrete: A three phase material. Cement and Concrete Research. Vol. 23, pp. 147-151. Pergamon Press Ltd.
- SFA, 2011. Silica Fume Association. Chapter 1 Understanding Silica Fume. http://www.silicafume.org/slideshow.cgi?p=64&c=1&l=68, downloaded: 2011.06.08.
- Takafumi, N., Tomosawa, F., Nemati, K. M., Chiaia, B. M., Fantilli, A. P., 2008. A Practical Equation for Elastic Modulus of Concrete. ACI Structural Jurnal. Title no. 106-S64 pp. 690-696.
- Zhou, F. P., Lydon, F. D., Barr, B. I. G., 1995. Effect of coarse aggregate on elastic modulus and compressive strength of high performance concrete. Cement and Concrete Research. Vol. 25, pp. 177-186. Pergamon Press Ltd.