

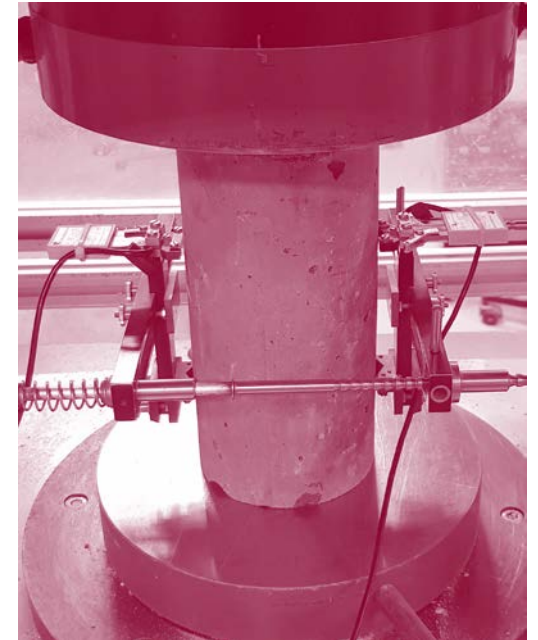


Betons elasticitetsmodul

Lasse Frølich
Betonteknolog, M.Sc.

| Agenda

1. Hvad er elasticitetsmodul?
2. Typiske værdier for elasticitetsmodul
3. Indflydelse af forskellige parametre
4. Styring af elasticitetsmodul



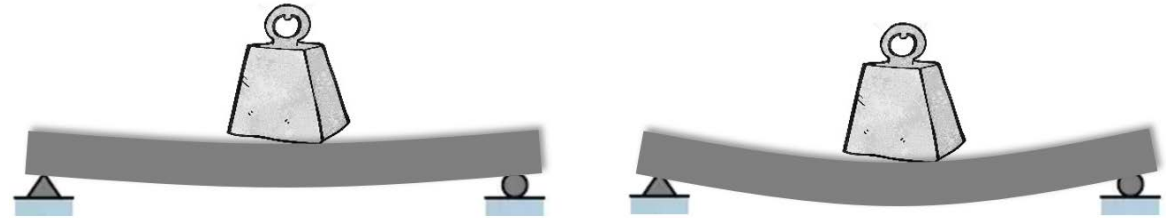
Hvad er Elasticitetsmodulet for en størrelse?

- Elasticitetsmodulet (E-modulet) er et tal for et materiales stivhed under elastisk deformation



Elastisk deformation

- I konstruktioner har E-modulet indflydelse på deformation (nedbøjning, udbøjning osv.)



Højt E-modul = lille nedbøjning

Lavt E-modul = stor nedbøjning

Hvorfor er Elasticitetsmodul et interessant?

Byggeriet i Danmark ændrer sig:

- Højere bygninger
- Slankere konstruktioner
- Specielle byggeprocesser



Ønske om højere E-modul

Mange henvendelser hos Aalborg Portland:

- Mangel på viden om design af beton med givet elasticitetsmodul
- Aalborg Portland kan være behjælpelig med rådgivning og prøvning



Bohrs Tårn i Carlsbergbyen (dagensbyggeri.dk)



Nordbro i København (magasinetkbh.dk)

Forskellige materials E-modul

- Diamant 1000 GPa
- Stål 200 GPa
- Aluminium 70 GPa
- Granit 50 GPa
- Flint 50 GPa
- Beton 30 GPa
- Sandsten 15 GPa
- Træ 10 GPa
- Gummi 0,1 GPa
- Kork 0,03 GPa



Mulighederne med beton er stærkt afhængige af tilslagstypen:

	Letklinker- beton	Stærk beton med Leca	Stærk beton med søsten	Højstyrke beton	Beton med metallisk tilslag
E-modul [GPa]	7	24	36	50	86



Eurocode

- E-modul beregnes ud fra Eurocode DS/EN 1992-1-1
- Historisk har der sjældent været krav til at måle E-modul
- Beregning af E-modul foretages ud fra trykstyrke
- Eksempler på Eurocode E-moduler:

Eurocode passer ikke nødvendigvis!

Styrkeklasse	C20/25	C30/37	C40/50	C50/60
E-modul [Gpa]	30	33	35	39

Gælder for beton med kvartstilslag (korrektion ved kalksten, sandsten eller basalt)

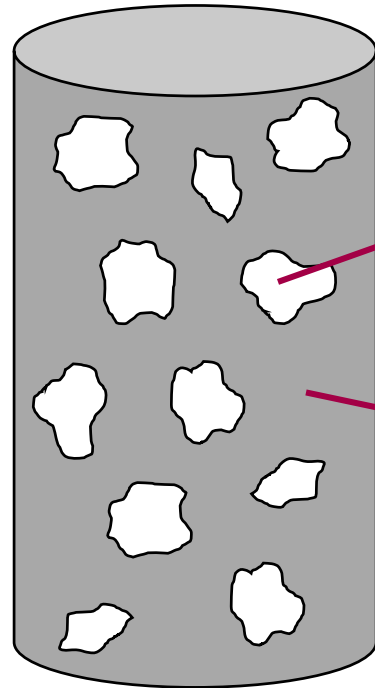
| E-modulet er en sammensat størrelse

E-modulet afhænger bl.a. af:

- Tilslagstype
- Tilslagsvolumen
- v/c
- Luftindhold

For styrken er den svageste komponent afgørende

For E-modulen vægtes hver komponent efter volumen



Sten har normalt højt E-modul

Cementpasta har normal lavt E-modul

Parameterstudie - laboratorieforsøg

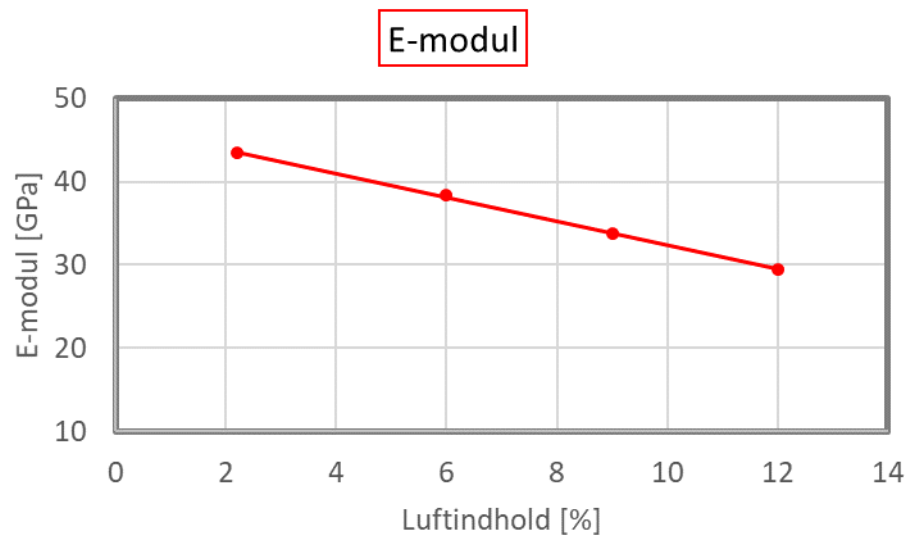
- Formålet er at undersøge indflydelse af betonsammensætning på E-modul
- Reference betonrecept (v/c 0,41)

Materiale	Kg/m ³
Rapid cement	385
Vand	156
Plast	0,7
0-1 mm kl. E sand	713
5-8 mm kl. E sten	40
8-16 mm kl. E sten	1134

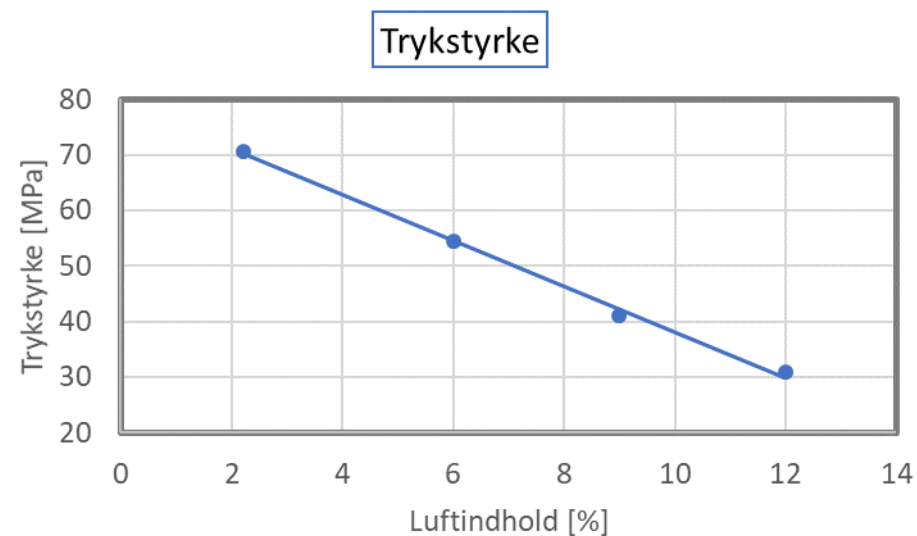


Måling af E-modul på Aalborg Portlands laboratorium

Indflydelse af luftindhold

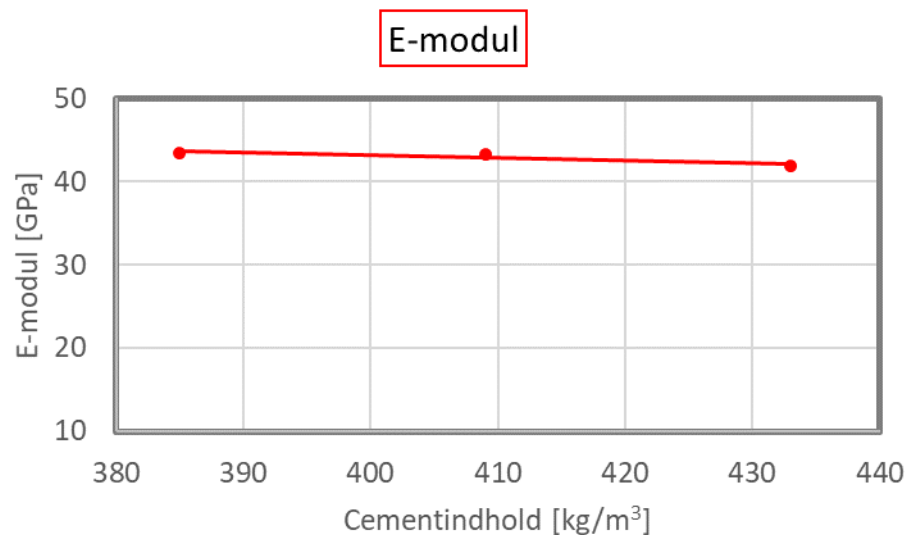


Hver procent luft reducerer
E-modul 3,3 %

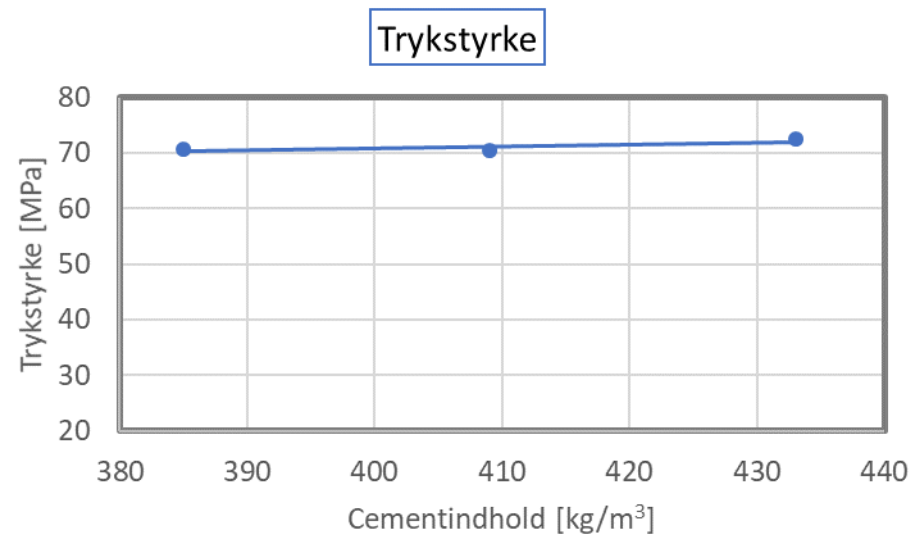


Hver procent luft reducerer
trykstyrke 5,8 %

Indflydelse af pastavolumen

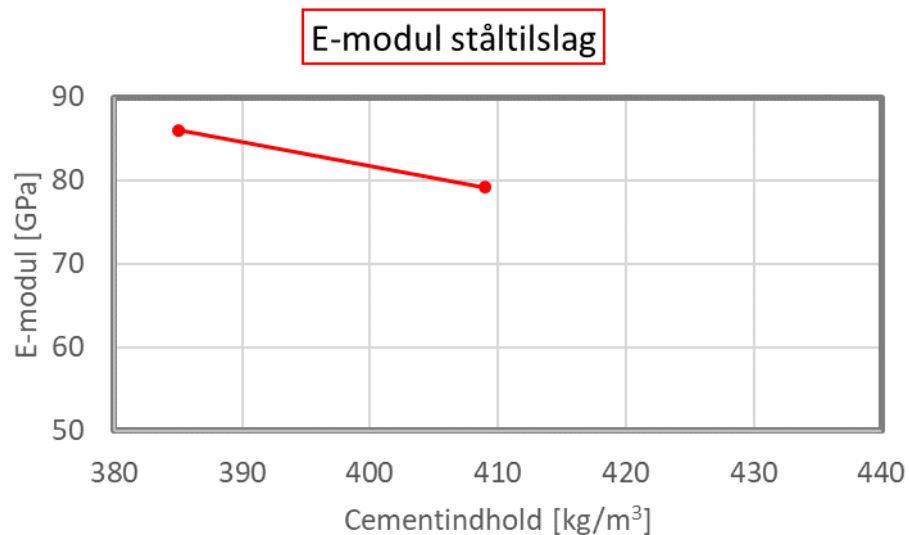


Næsten ingen indflydelse på E-modul
(1,5 GPa reduktion - på grænsen af
måleusikkerhed)

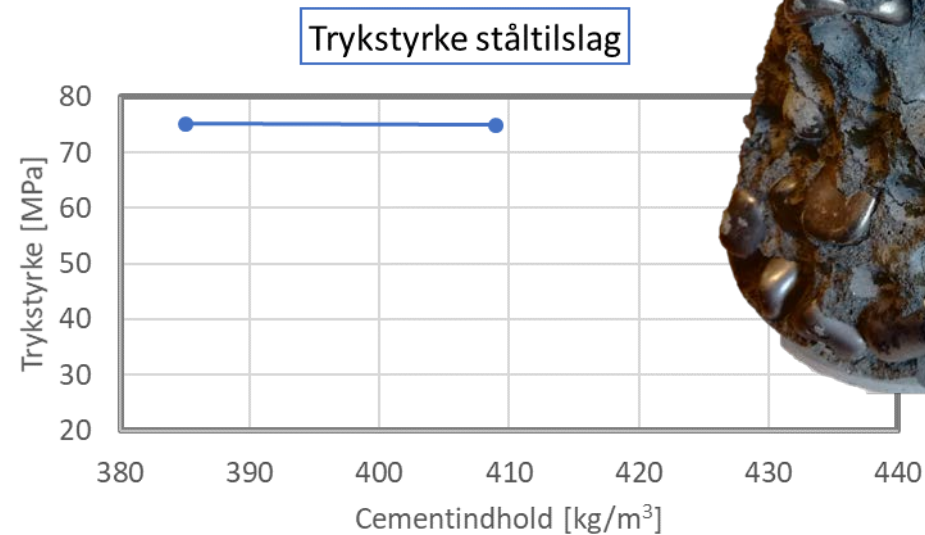


Næsten ingen indflydelse på styrke
(2 MPa forøgelse – på grænsen af
måleusikkerhed)

Indflydelse af pastavolumen med ståltilslag



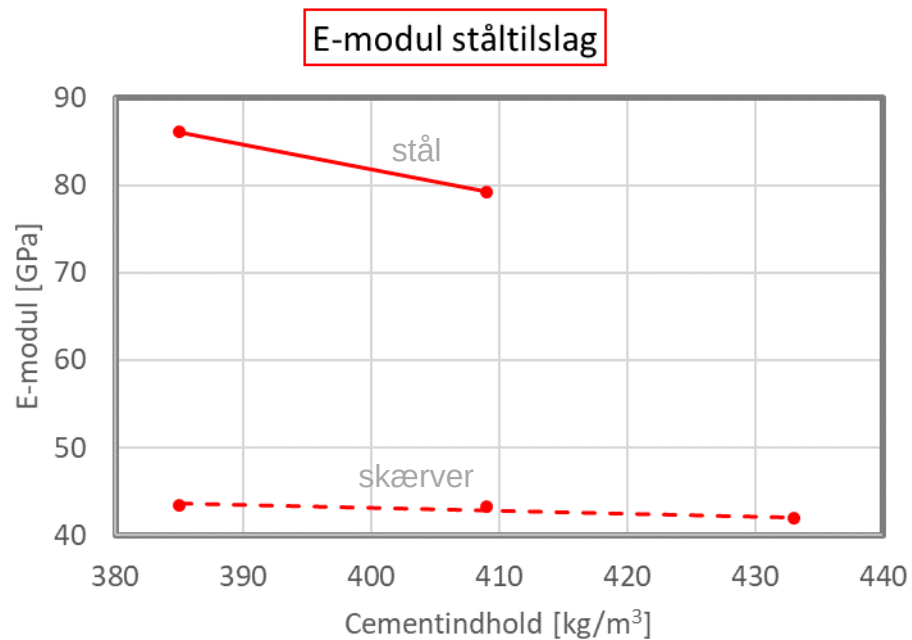
Betydelig reduktion af E-modul for højere pastavolumen



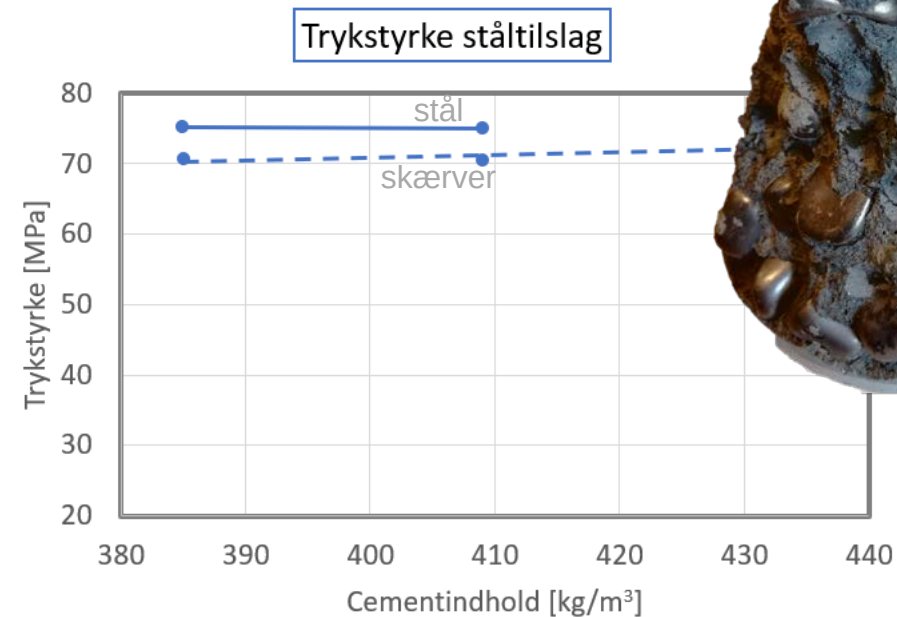
Ingen indflydelse på trykstyrke



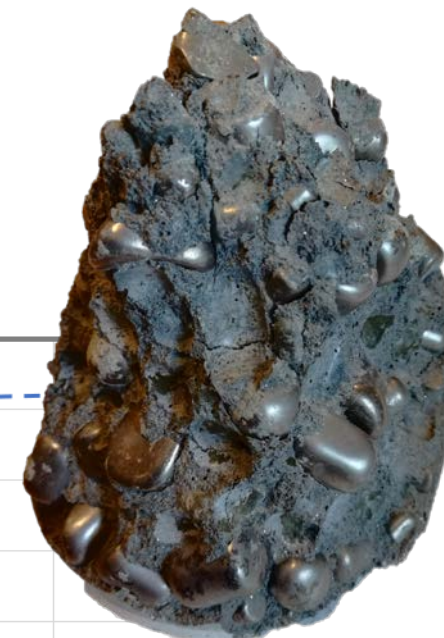
Indflydelse af pastavolumen med ståltilslag



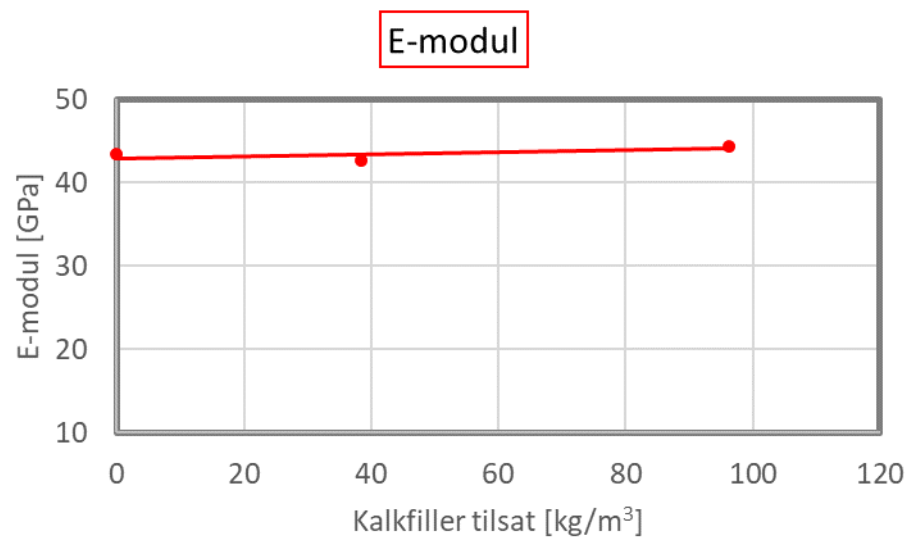
Enorm forøgelse af E-modul med ståltilslag



Minimal forøgelse af trykstyrke med ståltilslag

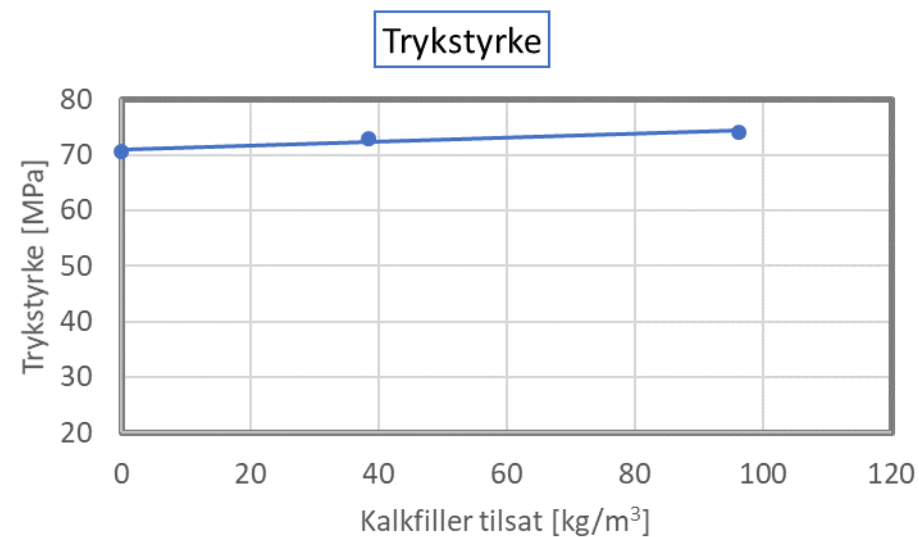


Indflydelse af kalkfiller



Ingen effekt på E-modul

(Mindre stigning skyldes
reduktion af luftindhold)



Ingen effekt på trykstyrke

(Mindre stigning skyldes
reduktion af luftindhold)

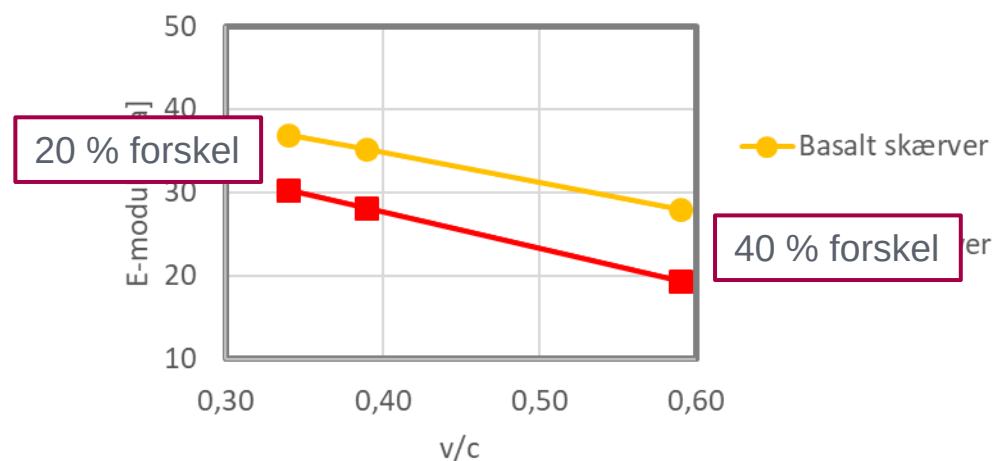
Kalkfiller erstatter sand i forsøgene

Indflydelse af v/c

Resultater fra litteraturen*

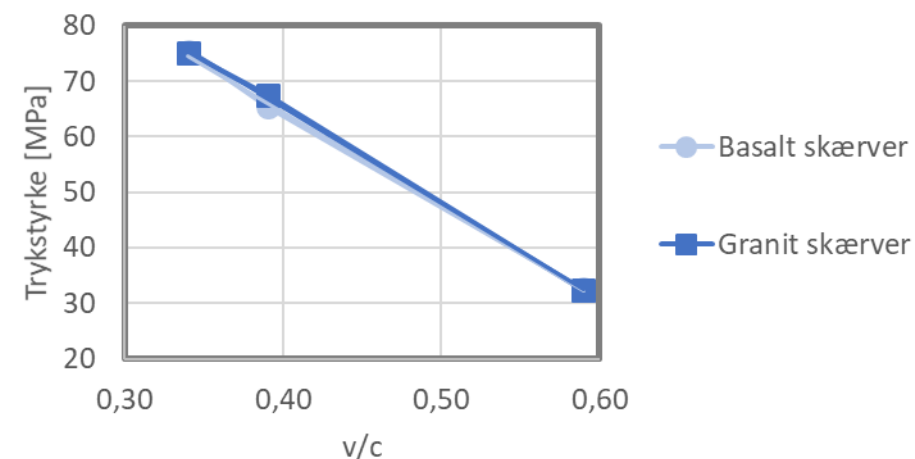
- To slags almindeligt anvendte norske tilslag

Eurocode: 20 % højere E-modul med basalt



Ændring i v/c på 0,10 giver en ændring i E-modul på 4,4 GPa

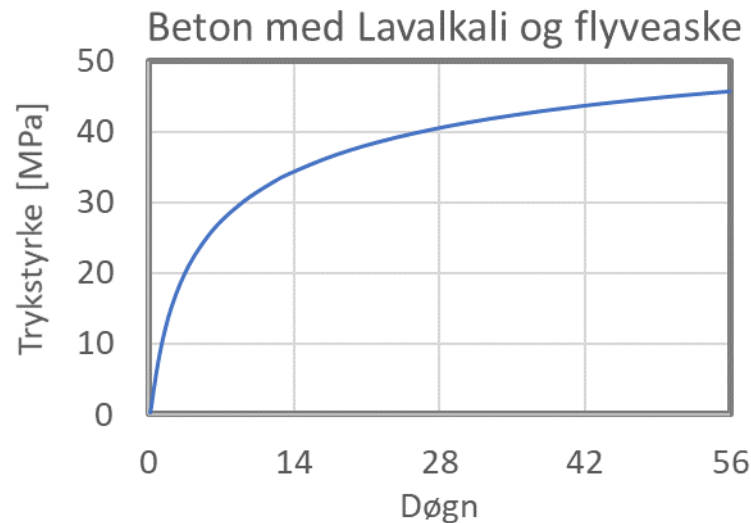
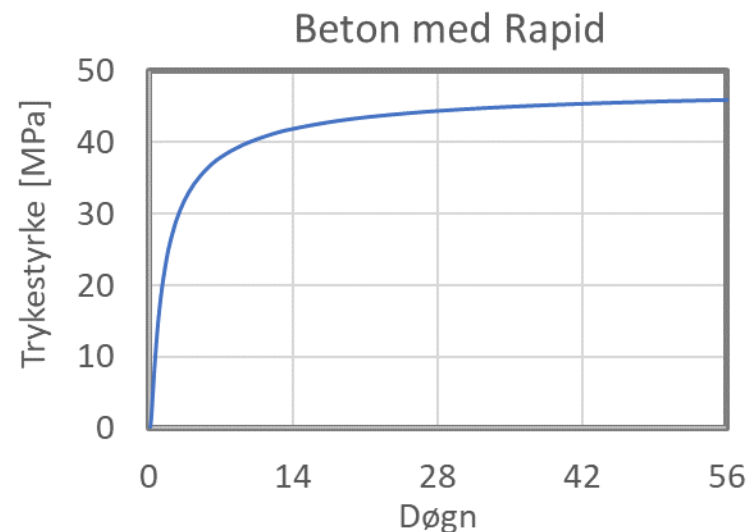
Trykstyrke



Ændring i v/c på 0,10 giver en ændring i trykstyrke på 17,2 MPa

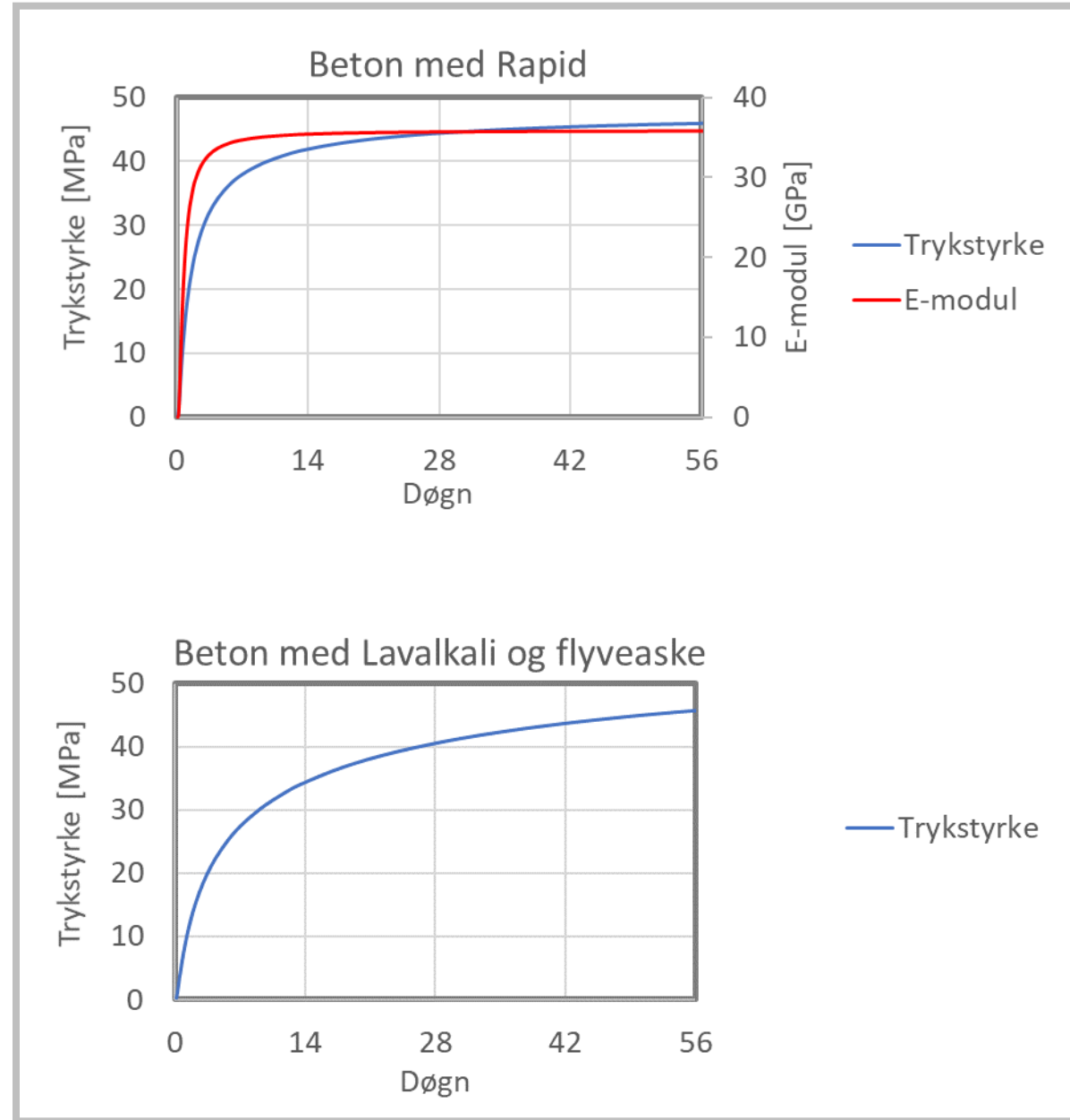
Udvikling af E-modul over tid

- E-modul udvikler sig hurtigere end trykstyrke
- Så længe trykstyrken udvikler sig, gør E-modulet også (dog ret begrænset efter de første døgn)



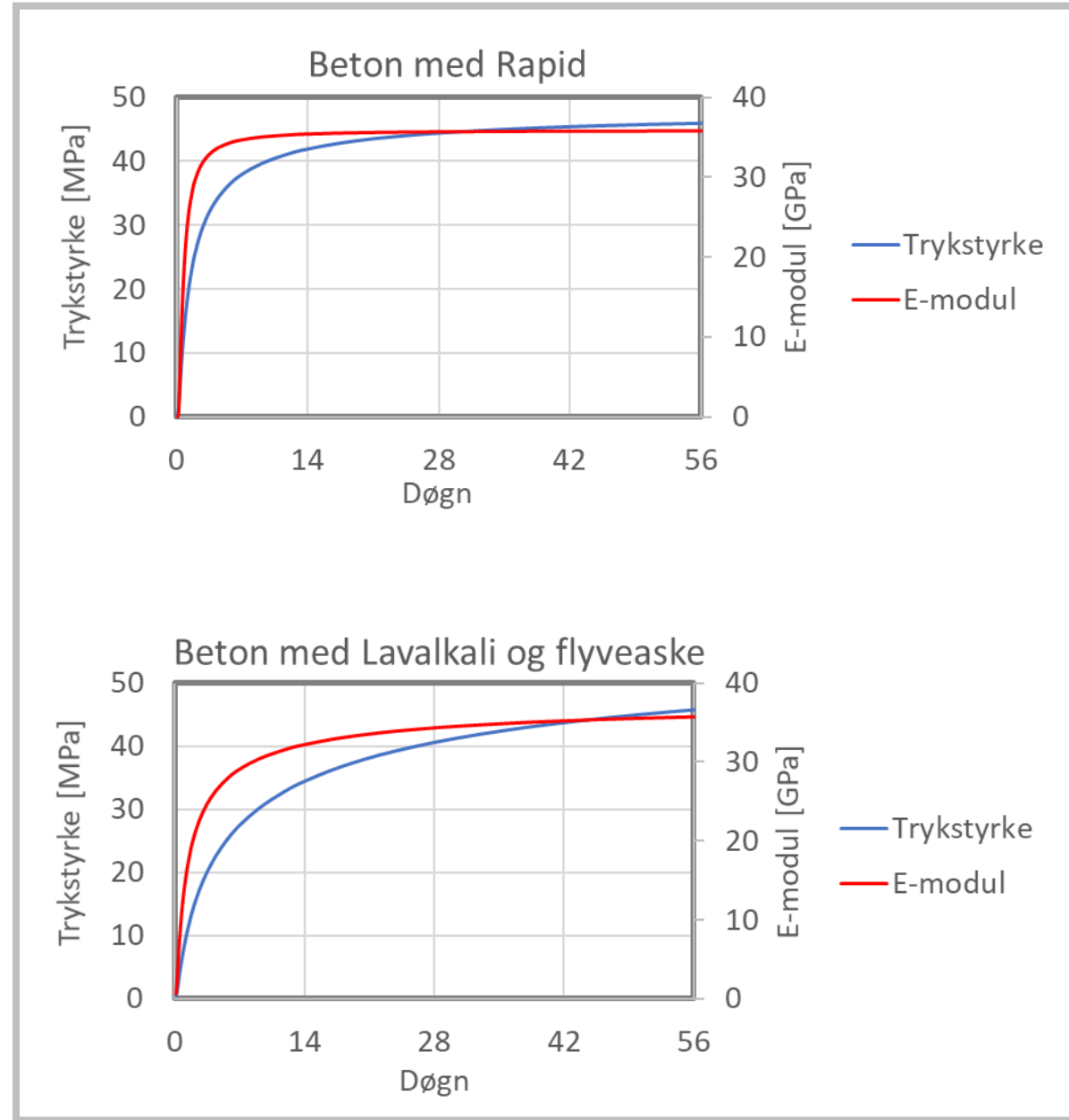
Udvikling af E-modul over tid

- E-modul udvikler sig hurtigere end trykstyrke
- Så længe trykstyrken udvikler sig, gør E-modulet også (dog ret begrænset efter de første døgn)



Udvikling af E-modul over tid

- E-modul udvikler sig hurtigere end trykstyrke
- Så længe trykstyrken udvikler sig, gør E-modulet også (dog ret begrænset efter de første døgn)



Effekt af tilslag

Generelt:

- Tilslag har afgørende betydning for E-modul!
- De fleste studier viser, at det grove tilslag har langt større betydning end det fine
- For at få højt E-modul skal man vælge tilslag med højt E-modul og så højt tilslagsvolumen som muligt
- Effekten af tilslagets E-modul er størst i svage betoner

Højt E-modul

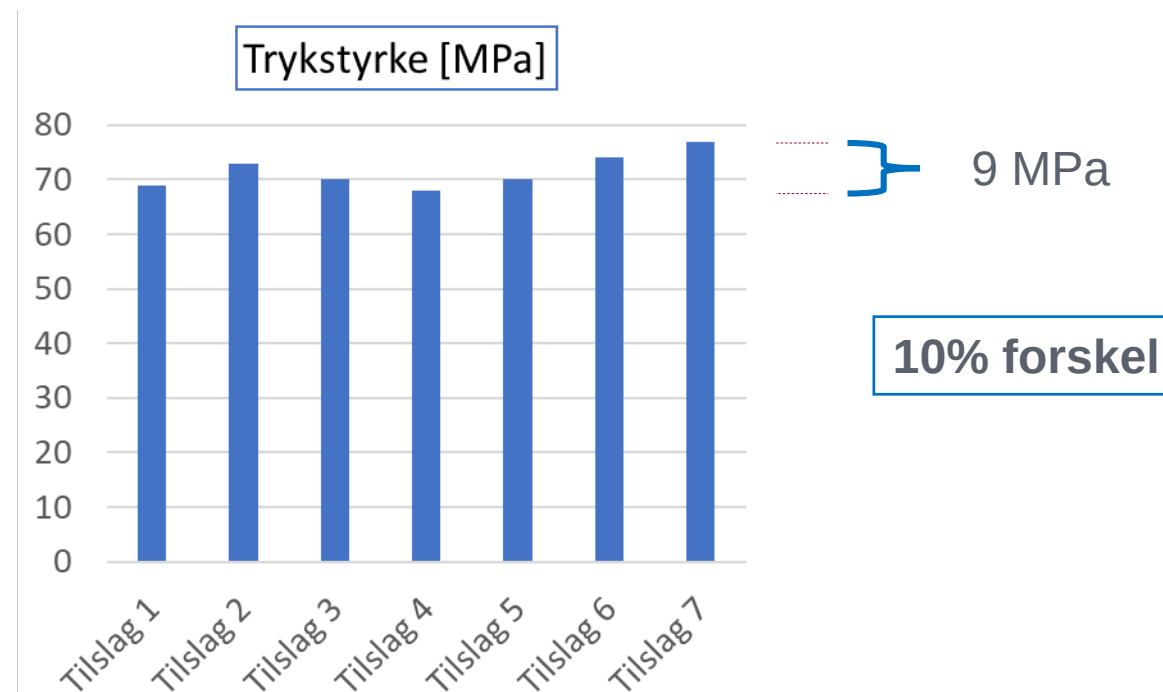
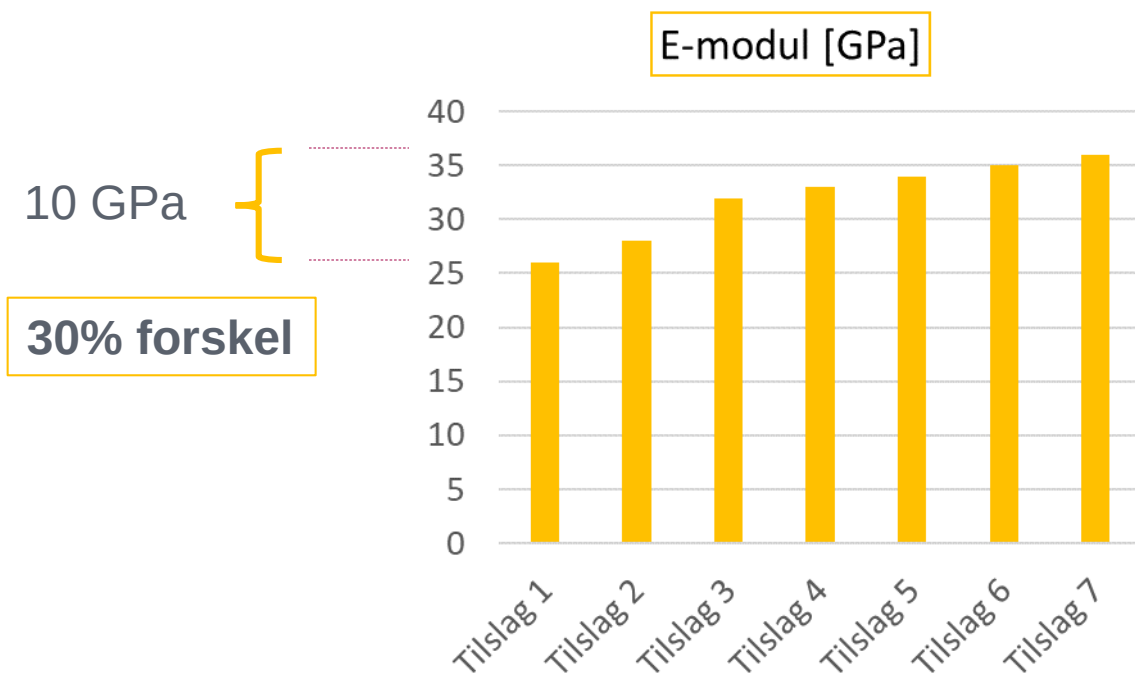
- Granit
- Kvarts
- Basalt

Lavt E-modul

- Sandsten
- Kalksten
- Marmor
- Glimmer
- Leca

Eksempel på effekt af tilslag

- Forskellige Norske granitter
- Testet i fast C55/67 recept
- Sag med krav til maks. E-modul på 29 GPa



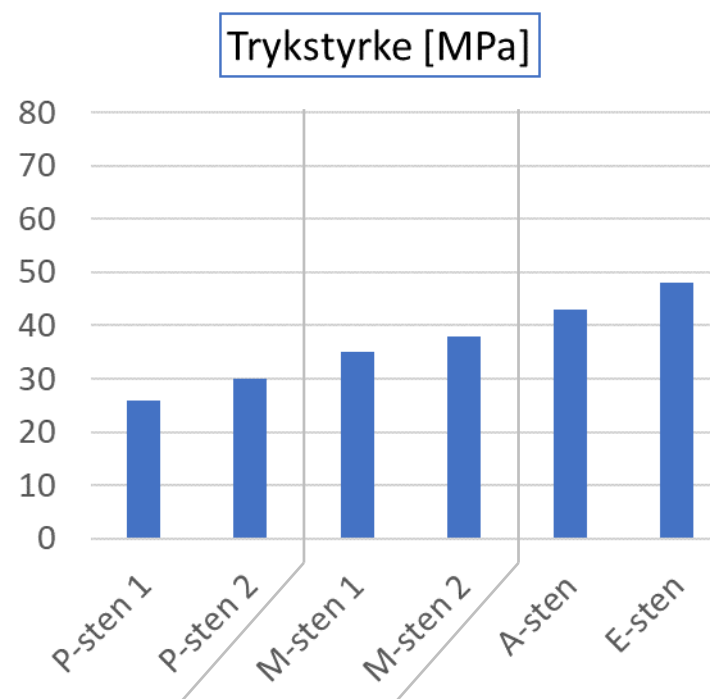
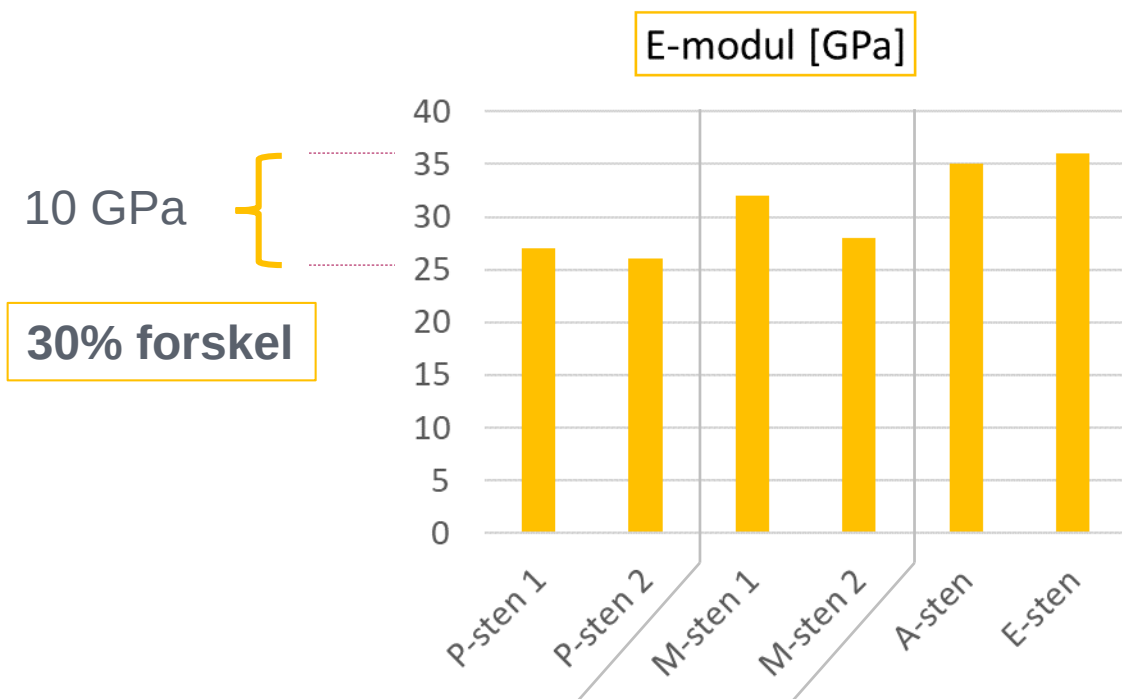
Indflydelse af forskellige danske tilslag



Indflydelse af forskellige danske tilslag

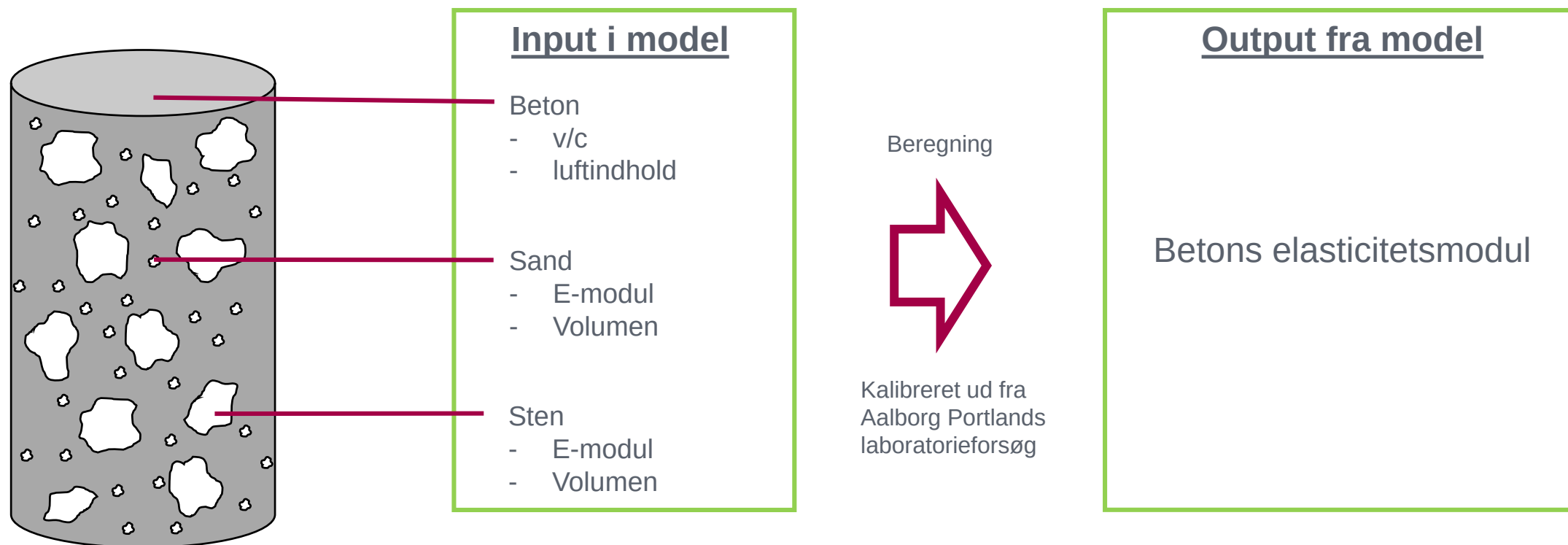
Forskellige danske tilslag

- Testet i fast M30 betonrecept med v/c 0,51



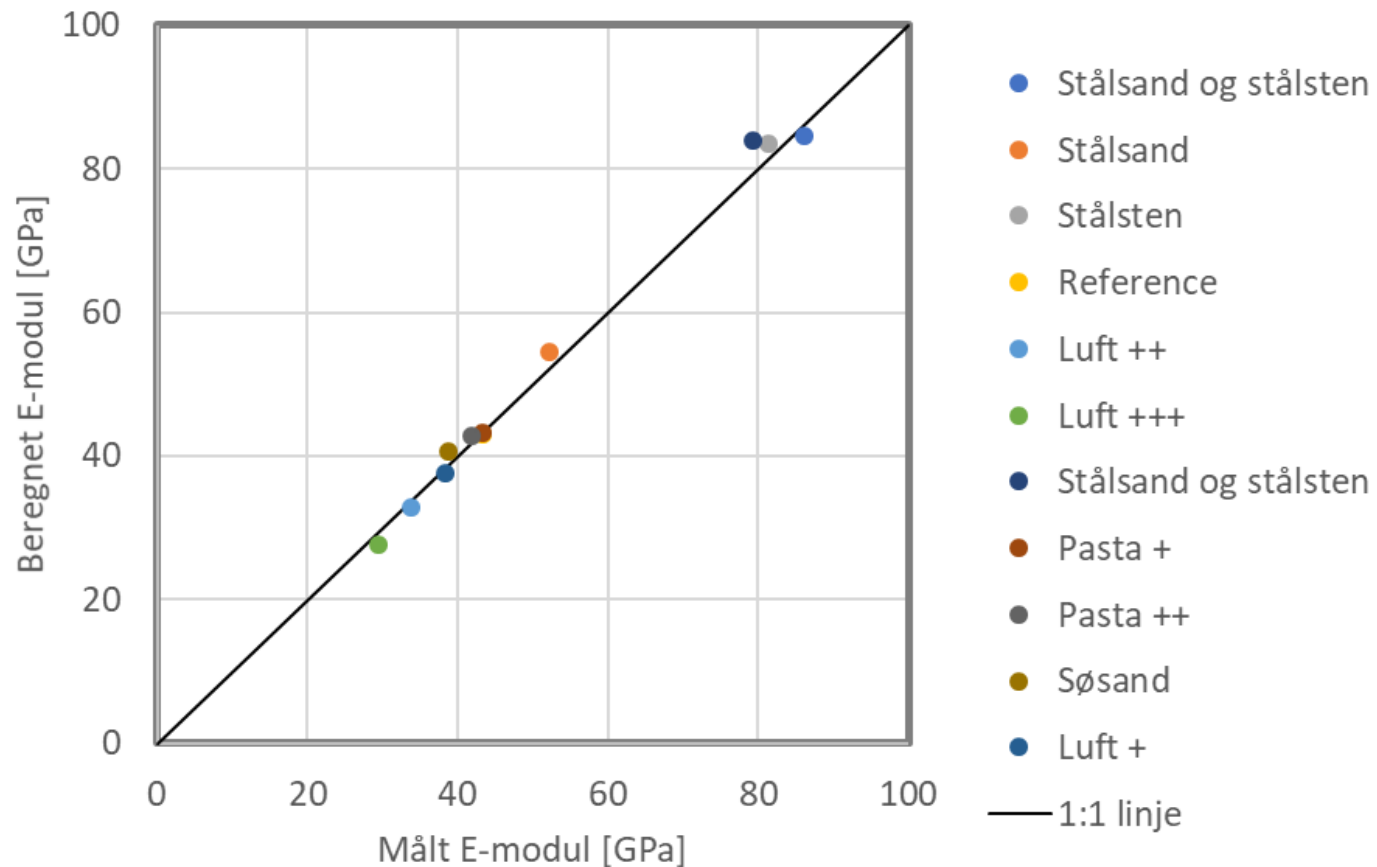
Teoretisk beregningsmodel

- Beton betragtes som bestående af 3 komponenter: Pasta, sand og sten
- Udgangspunkt i Hirsch model for stivhed af sammensatte materialer*



*Kilde: Effect of coarse aggregate on elastic modulus..., cement and concrete research, vol. 25, 1995

Overensstemmelse mellem model og målinger



Beregningseksempel

Beton M30	Kg/m ³
Rapid cement	310
Vand	160
Luftindblandingsmiddel	1
Plast	2
Bradsted 0/1 kl. E	754
Thyborøn 4/8 kl. A	197
Thyborøn 8/16 kl. A	843



Input

Beton

- v/c = 0,52
- Luft = 6 %

Sand

- E-mod = 65 GPa
- Vol = 285 l/m³

Sten

- E-mod = 50 GPa
- Vol = 394 l/m³

Beregning



Output

E-modul = 32 GPa

Beregningseksempel

Beton M30	Kg/m ³
Rapid cement	310
Vand	160
Luftindblandingsmiddel	1
Plast	2
Bradsted 0/1 kl. E	754
Thyborøn 4/8 kl. A	197
Thyborøn 8/16 kl. A	843



Input

Beton

- v/c = 0,52
- Luft = 2 %

Sand

- E-mod = 65 GPa
- Vol = 285 l/m³

Sten

- E-mod = 50 GPa
- Vol = 394 l/m³

Beregning



Output

E-modul = 32 GPa

E-modul = 38 GPa

For 2 % luft

Beregningseksempel

Beton M30	Kg/m ³
Rapid cement	310
Vand	160
Luftindblandingsmiddel	1
Plast	2
Bradsted 0/1 kl. E	754
Thyborøn 4/8 kl. A	197
Thyborøn 8/16 kl. A	843



Input

Beton

- v/c = 0,42
- Luft = 6 %

Sand

- E-mod = 65 GPa
- Vol = 285 l/m³

Sten

- E-mod = 50 GPa
- Vol = 394 l/m³

Beregning



Output

E-modul = 32 GPa

E-modul = 38 GPa

For 2 % luft

E-modul = 36 GPa

For v/c 0,42

Beregningseksempel

Beton M30	Kg/m ³
Rapid cement	310
Vand	160
Luftindblandingsmiddel	1
Plast	2
Bradsted 0/1 kl. E	754
Thyborøn 4/8 kl. A	197
Thyborøn 8/16 kl. A	843



Input

Beton

- | | |
|--------|--------|
| - v/c | = 0,42 |
| - Luft | = 2 % |

Sand

- E-mod = 65 GPa
- Vol = 285 l/m³

Sten

- E-mod = 50 GPa
- Vol = 394 l/m³

Beregning



Output

E-modul = 32 GPa

E-modul = 38 GPa

For 2 % luft

E-modul = 36 GPa

For v/c 0,42

E-modul = 42 GPa

For 2% og 0,42

Beregningseksempel

Beton M30	Kg/m ³
Rapid cement	310
Vand	160
Luftindblandingsmiddel	1
Plast	2
Bradsted 0/1 kl. E	754
Thyborøn 4/8 kl. A	197
Thyborøn 8/16 kl. A	843



Input

Beton

- v/c = 0,52
- Luft = 6 %

Sand

- E-mod = 65 GPa
- Vol = 285 l/m³

Sten

- E-mod = 25 GPa
- Vol = 394 l/m³

Beregning



Output

E-modul = 32 GPa

E-modul = 38 GPa For 2 % luft

E-modul = 36 GPa For v/c 0,42

E-modul = 42 GPa For 2% og 0,42

E-modul = 24 GPa For andre sten

Konklusion

- E-modulet er primært afhængig af det grove tilslag og v/c
- **Indflydelse af luft**
 - 1% ekstra luft giver 3,3 % lavere E-modul
- **Indflydelse af pastavolumen**
 - Har normalt kun svag indflydelse på E-modul
- **Indflydelse af kalkfiller**
 - Har ikke væsentlig indflydelse på E-modul
- **Indflydelse af v/c**
 - 0,10 lavere v/c giver 4,4 GPa højere E-modul
- Aalborg Portland kan være behjælpelig med bestemmelse eller estimering af E-modul

Betons elasticitetsmodul

Lasse Frølich
Betonteknolog, M.Sc.