

BETONS ELASTICITETS- MODUL

Hos Aalborg Portland oplever vi stigende interesse for betons elasticitetsmodul (E-modul). Mange kunder har de sidste par år henvendt sig med ønske om estimering eller måling af E-modul. Henvendelserne er typisk i forbindelse med projekter, hvor der er krav til et givet E-modul. Kravet er ofte, at E-modulet skal være større end en given værdi, men der er også eksempler på det modsatte. Som følge af denne interesse bringer vi her en artikel om emnet. Det fremgår af artiklen, at der kan opnås vidt forskellige E-moduler for samme trykstyrke. Vi er i øvrigt i gang med et større studie om styring af betons E-modul, som vil blive præsenteret på Portland Open 2019 til juni.

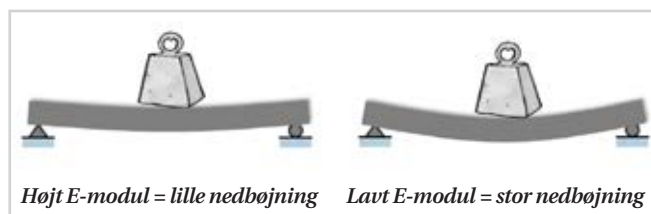
HVAD ER E-MODULET FOR EN STØRRELSE?

Når en ingeniør dimensionerer et betonbyggeri, kan det enten være brud, deformationer eller acceleration, der bestemmer størrelsen af en konstruktionsdel. Brud opstår, når betonens trykstyrke overstiges, mens deformationer afhænger af betonens E-modul.

Det er nemt at forholde sig til en trykstyrke – det er jo bare et tal for, hvor mange kilo kan man sætte ovenpå en cylinder, før den går i stykker. Helt så enkelt er det ikke med E-modulet.

E-modulet er et tal for betonens evne til at modstå deformation, når der påføres last.

Det kan illustreres som vist på figur 1, hvor en bjælke med lavt E-modul er påført en last og en bjælke med højt E-modul er påført en last af samme størrelse. Figuren viser, at beton med lavt E-modul deformerer mere; selv ved samme trykstyrke for de to betoner.



Figur 1 – Illustration af betydningen af E-modul

Det er hertil vigtigt at bemærke, at E-modulet ikke er et udtryk for, hvor meget betonen kan deformere, før den går i stykker – men blot hvor meget den deformerer for en given last.

Normal konstruktionsbeton har et E-modul på 25-40 GPa.

Lavere vand-cement forhold og højere styrke giver alt andet lige et højere E-modul. Tilslaget har dog også markant indflydelse, idet mere stift tilslag øger E-modulet.

I passiv miljøpåvirkning anvendes ofte bakkesten, som ofte giver lavere E-modul end søsten eller skærver. Typiske værdier ses nedenfor:

- Passiv og moderat miljøpåvirkning (C20/25 - C30/37): 25-35 GPa
- Aggressiv og ekstra aggressiv miljøpåvirkning (C35/45 - C40/50): 30-40 GPa

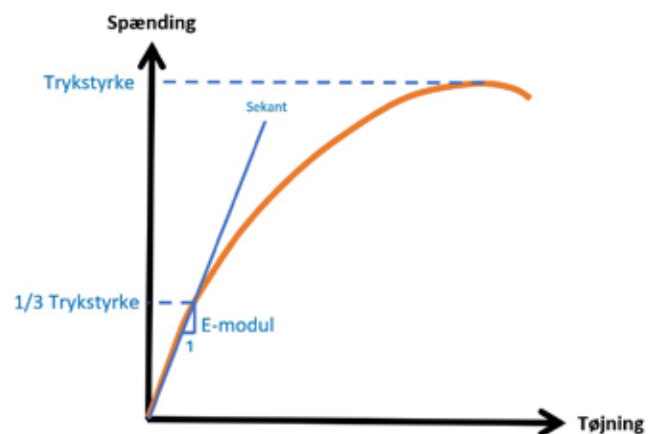
Betons elasticitetsmodul kan betragtes som en vægtet midelværdi af de enkelte delmaterialers E-modul. Cementpastaen har normalt et lavere E-modul end tilslaget, så der vil ofte opnås et højere E-modul ved reduktion af mængden af cementpasta. Betonens luftindhold vil også have indflydelse.

Til normal betonproduktion er der ikke krav om at måle E-modul. Når byggeri dimensioneres, anvendes der blot en værdi for E-modulet, som beregnes ud fra trykstyrken (og i nogen grad tilslagstypen) iht. Eurocode DS/EN 1992-1-1. Det beregnede E-modul kan afvige væsentligt fra det reelle, som det er illustreret senere i artiklen.

HVORDAN MÅLES BETONS E-MODUL?

E-modul bestemmes iht. DS/EN 12390-13, hvor det normalt er det såkaldte sekant E-modul, der bestemmes

(det initiale E-modul er også en mulighed). Princippet for bestemmelse af sekant E-modul er illustreret på figur 2.



Figur 2 – Arbejdskurve med bestemmelse af sekant E-modul ved 1/3 af trykstyrken

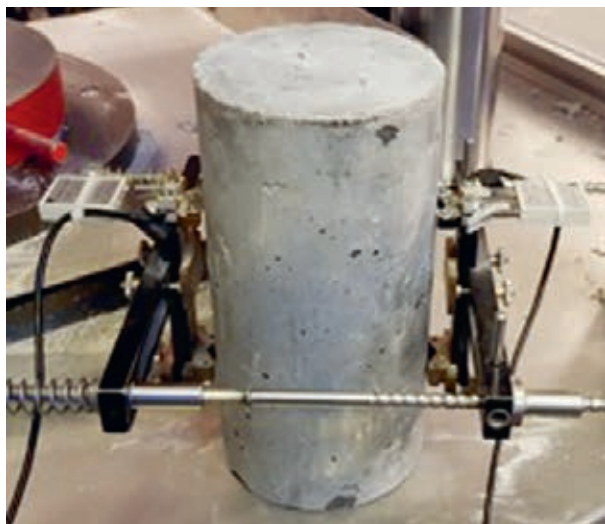
Der måles på cylindre (100/200 eller 150/300 mm). Til en måling anvendes normalt 3-4 cylindre. Der måles indled-

NYT FRA AALBORG PORTLAND

ningsvis trykstyrke på den første cylinder. Denne måling bruges til at fastlægge belastningsniveauet til målingen af E-modul på de resterende, idet der lastes op til 1/3 af trykstyrken, når der måles E-modul.

Ved måling af E-modul monteres en rig med minimum to flytningssensorer på en cylinder. Sensorerne måler sammentrykningen af cylinderen over en afstand på ca. 100 mm (afhængig af cylinderstørrelse). Sammentrykningen er i størrelsesorden 0,04 mm over denne afstand.

På figur 3 ses en cylinder med monteret rig til E-modul måling.



Figur 3 – Måling af E-modul

HVOR HØJT ELLER LAVT KAN BETONS E-MODUL BLIVE?

Det er muligt at designe beton med meget højt eller meget lavt E-modul ud fra trykstyrke og tilslagetes karakteristika. I tabel 1 ses eksempler på hvad der kan opnås, når man tager det til ekstremerne.

Tabel 1 – E-moduler for forskellige betoner

	Letklinkerbeton	Stærk beton med Leca	Stærk beton med søsten	Højstyrke beton	Beton med metallisk tilslag
E-modul [GPa]	7	24	36	50	86
Trykstyrke [MPa]	6	60	61	130	81

CASE FRA NORGE MED KRAV OM MAKS. 29 GPa

Aalborg Portland har været involveret i en sag i Norge, hvor en bro skulle efterspændes. Her var der for en særlig konstruktionsdel krav til, at betonen skulle have et E-modul under 29 GPa. Det er isoleret set ikke vanskeligt at opnå, da det blot er et spørgsmål om at sænke styrken tilstrækkeligt. Der var dog samtidigt et krav om, at betonen skulle være styrkeklasse C55/67. I tabel 2 ses resultater fra forsøg med forskellige tilslag i fast recept. Tilslagstyperne er alle normale sand og sten, som anvendes til betonproduktion i Kristiansand området.

Tabel 2 – Målinger af 28 døgns E-modul og trykstyrke for C55/67 beton med forskellige tilslag

	Tilslag 1	Tilslag 2	Tilslag 3	Tilslag 4	Tilslag 5	Tilslag 6	Tilslag 7
E-modul [GPa]	26	28	32	33	34	35	36
Trykstyrke [MPa]	69	73	70	68	70	74	77

Det ses, at der kan være op til 10 GPa forskel i E-modulet afhængigt af tilslagstypen. Tilslagstypen har også indflydelse på trykstyrken, men dog i mindre omfang (variationskoefficienten er tre gange større for E-modulerne end trykstyrkerne). Der er også bestemt E-modul og trykstyrke efter 7 døgn på betonerne. Resultaterne viste, at styrketilvæksten fra 7 til 28 døgn var 28 %, mens E-modultilvæksten kun var 7 % (middelværdier). E-modulet udvikles altså hurtigere end styrken, når betonen hærder.

KNUST BETON SOM TILSLAG

Anvendelse af knust beton som tilslag reducerer normalt E-modulet. Der kan forventes en reduktion i størrelsesorden 0-20 %. Reduktionen skyldes, at pastaen normalt har lavere E-modul end tilslaget, og at andelen af pasta er højere i beton med knust beton som tilslag. Hvis donerbetonen har et højt E-modul eller hvis erstatningsgraden er lav, vil effekten dog være ubetydelig.

TYPISKE STEN ANVENDT I DANMARK

I Danmark anvendes primært tre typer tilslag: Bakkesten, søsten og skærver. I tabel 3 ses resultater for E-modul og styrke for en C30/37 recept produceret med forskellige danske sten.

Tabel 3 – E-modul for fast betonrecept med forskellige danske sten

	C30/37 med Bakkesten 1	C30/37 med Bakkesten 2	C30/37 med Søsten	C30/37 med Skærver
E-modul [GPa]	28	31	33	35
Trykstyrke [MPa]	38	35	43	48

Tabel 3 viser, at der opnås højere E-modul med søsten og skærver end med bakkesten. Bakkesten er nok den tilslagstype, hvor der kan være størst geografisk variation. Sten fra nogle lokationer består primært af stive bjerg-

arter som flint og granit, mens sten fra andre indeholder flere bløde sandsten og kalksten. Derfor kan der forventes betydelige variationer i E-modul afhængigt af, hvor bakkesten kommer fra.

PERSPEKTIVERING

E-modulet er en egenskab, der afhænger af mange af de samme ting som trykstyrken. Indflydelsen kan dog være noget forskellig, som det er illustreret i denne artikel. Det er ikke detaljeret kortlagt, hvilket E-modul man opnår med sand og sten fra forskellige lokaliteter i Danmark (eller forskellige importerede materialer), og det er derfor vanskeligt på forhånd at estimere E-modulet for en given beton. Aalborg Portland arbejder på en beregningsmodel til dette formål.

Den voksende interesse for betons E-modul har sandsynligvis noget at gøre med ændringer i den måde bygninger designes på. E-modulet bliver særlig interessant, når der anvendes forspændt eller efterspændt beton. Desuden er der en tendens til at vi bygger højere, og det vil også gøre E-modulet mere afgørende.