

Bestämning av betongens dynamiska E-modul vid tidig ålder

Jämförelse med statisk E-modul

Masood Namazi

SEKTIONEN FÖR VÄG & VATTENBYGGNAD
AVDELNINGEN FÖR BÄRANDE KONSTRUKTIONER
LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA
BOX 118
221 00 LUND

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
DIVISION OF STRUCTURAL ENGINEERING
LUND INSTITUTE OF TECHNOLOGY
BOX 118
S-221 00 LUND
SWEDEN

BESTÄMNING AV BETONGENS DYNAMISKA E-MODUL VID TIDIG ÅLDER.

JÄMFÖRELSE MED STATISK E-MODUL.

DETERMINATION OF DYNAMIC E- MODULUS OF THE CONCRETE AT
EARLY AGES. COMPARISON TO STATIC E-MODULUS.

AV

MASOOD NAMAZI

1993

ABSTRACT: The dynamic and static E-modulus of the concrete at very early ages (a few hours after casting) has been determined and the results has been compared. The dynamic modulus has been determined for 40×40×160 mm specimens with the resonance frequency method and the static E-modulus has been determined for cylinder specimens Ø 100×200 mm with the stress strain method.

FÖRORD

Detta examensarbete har utförts vid institutionen för Bärande konstruktioner, Lunds Tekniska Högskola.

Först vill jag tacka mina både handledare professor Sven Thelandersson och doktorand Agnes Nagy som under arbetets gång hjälpte mig med värdefulla råd.

Göran Hedenblad, högskoleadjunkt vid avdelningen för byggnadsmateriallära, tackar jag för hans handledning av den teoretiska modell som beskrivs i kapitel fyra. Vidare vill jag tacka Per Hammer, docent vid institutionen för Teknisk akustik för hans hjälp med de dynamiska mätningarna.

Per Olof Rosenqvist tackar jag för hans hjälp under statiska mätningar. Dessutom riktar jag ett stort tack till personalen vid betongstationen, speciellt Bo Johansson som hjälpte mig med tillverkningen av provkropparna.

Lund i februari 1993

Masood Namazi

SAMMANFATTNING

Denna rapport redovisar resultat av laboratorieförsök för bestämning av betongens dynamiska elasticitetsmodul och jämförelse med den statiska E-modulen vid ett tidigt skede efter gjutning.

Detta var en fråga som uppstod i samband med utvecklingen av en teoretisk materialmodell baserad på finita elementmetoden för beräkning av temperaturframkallade egenspanningar och bedömning av risken för sprickbildning i betongkonstruktioner vid tidig ålder /3/. Värdet på E-modulen behövs som ingångsparameter i beräkningsmodellen. Med hänsyn till de svårigheter som uppstår i samband med bestämning av den unga betongens statiska E-modul kan mätningen av dynamisk E-modul vara ett mer praktiskt alternativ. Laboratorieförsöken omfattar två delmoment:

1. Bestämning av den dynamiska E-modulen genom resonansfrekvensmätning.
2. Bestämning av den statiska E-modulen genom tryckprovning och jämförelse med de uppmätta dynamiska E-modulvärdena från moment 1.

Dessutom beskrivs en teoretisk modell för uppskattning av den unga betongens E-modul och dess tillväxt med tiden.

Mätningarna utfördes för två olika betongblandningar, en blandning med standardcement och en med anläggningcement. Betongrecepten framgår av bilaga A. Den dynamiska E-modulen mättes genom resonansfrekvensmätning på provkroppar med måtten 40×40×160 mm. Statisk E-modul bestämdes genom tryckprovning av cylindriska provkroppar med måtten \varnothing 100×200 mm.

Provningarna började när betongen var drygt 5 timmar gammal. Resultatet av undersökningen kan sammanfattas enligt följande:

- vid ett mycket tidigt skede efter gjutningen kan betongens dynamiska E-modul bestämmas genom resonansfrekvensmätning.

- jämfört med bestämning av den statiska E-modulen genom tryckprovning är mätningen av den unga betongens dynamiska E-modul enklare, mindre tidskrävande och lättare att utföra praktiskt. Därför kan bestämning av den dynamiska E-modulen framstå som ett alternativ till den statiska E-modulen.
- en jämförelse mellan de uppmätta statiska och dynamiska E-modulerna vid den aktuella undersökningen visade att skillnaden mellan betongens statiska och dynamiska E-modul var stor vid mycket tidig ålder. Ca 9 och 30 timmar efter gjutningen visade sig den dynamiska E-modulen vara ungefär 60% större än den statiska för betong tillverkad av standard respektive anläggningcement. Skillnaden mellan de två E-modulvärdena minskade snabbt med ökande ålder.
- E-modulsutvärdering enligt den teoretiska modell som beskrivs i kapitel 4 visade mycket bra överensstämmelse med de i laboratoriet uppmätta dynamiska E-modulvärdena.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

Förord

Sammanfattning

	Sid
1. Inledning	1
1.1. Bakgrund och syfte	1
1.2. Förstudier	3
1.3. Avgränsningar	4
1.4. Rapportuppläggning	4
2. Laboratorieprovningar	5
2.1. Betongens elasticitetsmodul	5
2.2. Bestämning av den unga betongens dynamiska E-modul	6
2.2.1. Standardmetoder för mätning av betongens dynamiska E-modul	6
2.2.2. Mätmetod använd vid denna undersökning	7
2.2.3. Provförande	9
2.2.4. Materialets förlustfaktor	10
2.3. Bestämning av statisk E-modul	12
3. Mätresultat	14
3.1. Jämförelse av uppmätta E-modulvärden	20
3.2. Teoretiskt samband mellan betongens dynamiska och statiska E-modul	22
4. Teoretisk modell för uppskattning av betongens E-modulstillväxt	24
4.1. Utvärdering av cementpastans E-modultillväxt	25
4.2. Ballastfasens E-modul	25
4.3. Exponenten n	26
4.4. Modellens tillämpning	27
5. Slutsatser	28

Referenser	29
------------	----

Bilagor:

A. Betongrecept	31
B1. Formel för beräkning av koefficient C (i samband med beräkning av dynamisk E-modul)	32
B2. Mekanisk admittans	35
C1. Granskning av avvikelserna mellan deformationsgivarna	36
C2. Krypkoeficientens åldersberoende som funktion av relativ hållfasthet	37
D1. Beräkning av koefficienten a (i samband med teoretiska modellen)	38
D2. Tabell (mängden kemiskt bundet vatten)	39
E. Diagram och tabeller från provningarna	40

1. INLEDNING

Föreliggande examensarbete handlar om ett laboratorieförsök för bestämning av betongens dynamiska E-modul och jämförelse med den statiska E-modulen vid tidig ålder. Arbetet med detta examensarbete kan sammanfattas i följande moment:

1. Att genom litteraturstudier och med hänsyn till tillgängliga resurser komma med förslag till provningsmetoder.
2. Att utföra provningarna genom att
 - skaffa eller tillverka nödvändiga mätinstrument
 - gjuta provkropparna
3. Att bearbeta provningsresultaten och dra slutsatser.

1.1. Bakgrund och syfte

En viktig gren inom betongforskningen är forskningen om betongens egenskaper vid tidig ålder. Perioden "tidig ålder" under betongens mognadstillväxt kännetecknas av snabba förändringar i betongegenskaperna. Beroende på olika faktorer får man använda definitionen tidig ålder för de första timmarna, dagarna och i vissa fall även den första veckan efter betonggjutningen. När man gjuter i ett torrt klimat, kallas den period då det finns risk för plastiska krympdeformationer för tidig ålder. I annat fall är tidig ålder den tidslängd som formen måste sitta kvar för att man vid avformningen skall undvika ytsprickor /1/.

I Sverige har man, sedan slutet av 60-talet, genomfört flera forskningsprojekt i samband med undersökningen av betongens egenskaper vid ett tidigt skede efter gjutningen. Bland annat är Jan Byfors rapport "Plain Concrete at Early Ages" resultatet av ett omfattande forskningsarbete som inleddes i mitten av 70-talet /1/.

Kunskapen om betongens egenskaper vid tidig ålder är speciellt viktigt med hänsyn till bl a följande frågor:

- tidig avformning vilket medför stora kostnadsbesparingar, genom användandet av mindre mängd gjutformar och kortare produktionstid.
- att kunna påverka och styra gjutnings-och härdningsprocessen, för att få önskad kvalitet och egenskap på slutprodukten.
- att kunna bedöma risken för sprickbildning som orsakas av uppkomsten av temperaturframkallade egenspanningar vid tidig ålder.

Av punkterna ovan är den sistnämnda speciellt viktigt att beakta. Samspelet mellan olika materialegenskaper, de rådande miljöförhållanden under gjutningen och härdningsperioden samt belastningen orsakar sprickbildning i betong. Förekomsten av sprickor i betong medför förutom reduktion av hållfastheten, att risken för att konstruktionen inte ska uppfylla krav på täthet, beständighet och utseende ökar.

Jämfört med andra perioder under betongkonstruktionens livstid är risken för sprickbildning störst vid ett tidigt skede efter gjutningen. I litteraturen återfinns ett antal teoretiska modeller för beräkning av egenspanningar och bedömning av sprickbildningsrisken vid tidig ålder. Exempel på en sådan teoretisk beräkningsmetod är Mats Emborgs matematiska modell för bestämning av det tidiga egenspanningsförloppet i betongkonstruktioner /2/. Vid avdelningen för Bärande konstruktioner, LTH, har man, i samband med ett pågående forskningsarbete, utvecklat en beräkningsmodell baserad på finita elementmetoden för beräkning av egenspanningar vid tidig ålder /3/.

Bestämning av det tidiga spänningsförloppet enligt dessa teoretiska modeller kräver kännedom om vissa tidsberoende parametrar som betongens krypning, elasticitetsegenskaper och termiska egenskaper. Dessa materialegenskaper bestäms vanligen genom statiska laboratorieprovningar.

Att bestämma betongens statiska E-modul vid tidig ålder genom provning medför dock stora problem av vilka de viktigaste är:

- avformning av tämligen stora provkroppar vid ett mycket tidigt skede efter gjutningen (efter drygt 5 timmar).
- svårigheter att hitta optimal upphängningsanordning för deformationsgivarna speciellt med tanke på betongens plastiska tillstånd vid tidig ålder.

Huvudsyftet med detta examensarbete är att undersöka möjligheten till att genom tillämpning av någon dynamisk mätmetod bestämma betongens dynamiska elasticitetsmodul vid tidig ålder. Dessutom skall förhållandet mellan den dynamiska och statiska E-modulen för några timmar gammal betong undersökas. I examensarbetet skall prövas möjligheten att ersätta statisk E-modulmätning med dynamisk E-modulbestämning som är avsevärt enklare.

1.2. Förstudier

Arbetet inleddes med litteraturstudier för att bli välja mätmetod för provningarna. Dynamiska och statiska mätmetoder för bestämning av den hårdnade betongens elasticitetsmodul regleras i såväl svenska som internationella standarder. Men varken dessa standarder eller äldre forskning tar upp frågan om metodernas lämplighet för ung betong. Trots detta användes, i denna undersökning, i stort sett samma metoder som i fallet med provning av härdad betong.

Efter val av provningsmetoder genomfördes en del dynamiska och statiska förförsök. Syftet med förförsöken var att bli välja ett bra alternativ bland de olika tillgängliga mätinstrumenten, bestämma lämplig provkroppstorlek och försökupställning. Resultatet av förförsöken är följande:

- tidpunkt för avformning av provkropparna bestämdes till 4-5 timmar efter gjutning.
- att de dynamiska provningarna skulle genomföras med mätinstrumentet "Hewlett Packard 3582 A Spectrum Analyser".

- för de statiska provningarna bestämdes att universal provningsmaskinen "MTS 810 Material Test System" skulle användas. Deformationsmätare av typ "LVDT Spring Return" användes. För att kunna registrera deformationen tillverkades en mätram bestående av två aluminiumringar som fixeras mot provkroppen med hjälp av fjädrande låssprintar.

Efter förförsöket genomfördes provningarna i enlighet med beskrivningen i kapitel 2.

1.3. Avgränsningar

På grund av resursbrist bestämdes den statiska E-modulen genom tryckprovning av en enda provkropp vid varje provtillfälle vilket betyder att spridningen inte kontrollerats. På grund av provningsmaskinens låga kapacitet (max 100 kN) kunde provkropparna inte tryckas till brott efter att betongens hållfasthet blev högre än 12 MPa.

1.4. Rapportuppläggning

I kapitel två beskrivs hur de dynamiska och statiska mätningarna utfördes. I kapitel tre redovisas resultaten från provningarna. Kapitel fyra beskriver en teoretisk modell för utvärdering av betongens dynamiska E-modul. Slutsatser diskuteras i kapitel fem.

2. LABORATORIEPROVNINGAR

Provningarna genomfördes för två olika typer av betongblandningar. En blandning med standardcement (Slite), vct 0,61 och en med anläggningcement (Degerhamn), vct 0,54. Ingen tillsatsmedel användes. Ballasten bestod av kvartsit makadam i fraktionen 0-8 mm och siktad naturgrus 0-4mm. I tabell 1, bilaga A, redovisas de recept som användes i denna undersökning.

2.1. Betongens elasticitetsmodul

Betong är inte ett rent elastiskt material d v s sambandet mellan spänning och töjning är inte linjärt. Dessutom påverkas betongen av krypeffekter (tidsberoende deformationer). Detta medför att man kan definiera två olika typer av elasticitetsmodul för betong enligt följande:

1. Statisk E-modul

Den statiska E-modulen (E_s) definieras som kvoten mellan spänning och deformation. Man skiljer mellan tangentmodulen (E_{tg}) och sekantmodulen (E_{sek}). E_{tg} utgör tangentens lutning och E_{sek} sekantens /13/. För att mätningen skall vara reproducerbar definieras E-modulen vid bestämda spänningsnivåer.

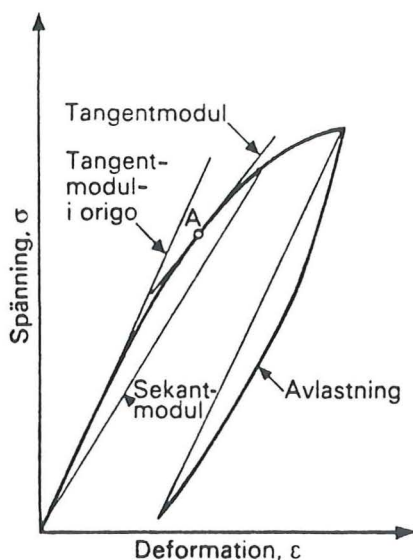


Fig.1. Olika definitioner av statisk E-modul. /13/.

2. Dynamisk E-modul

Betongens dynamiska E-modul (E_d) bestäms, som framgår av namnet, genom att betongen belastas dynamiskt. Den dynamiska E-modulen mäts vid mycket låga belastningsnivåer och under mycket korta belastningstider. Detta gör att den dynamiska E-modulen är fri från inverkan av krypeffekter och således blir större än den statiska. Eftersom den dynamiska elasticitetsmodulen inte påverkas av krypning ger den en bättre bild av betongens elastiska egenskaper.

2.2. Bestämning av den unga betongens dynamiska E-modul

Betongens dynamiska E-modul bestäms vanligen genom tillämpning av någon skick icke förstörande testmetod. Icke förstörande testmetoder används för att bl a:

- bestämma materialegenskaper
- kartlägga materialskador genom att t ex lokalisera sprickor och bedöma deras utsträckning

Till skillnad från många andra konstruktionsmaterial är betongens slutliga kvalite och egenskaper inte fullständigt förutsägbara. Det enda som är känt från början är de olika delmaterialens specifika egenskaper. Detta medför stort behov av kontroll över de olika egenskapernas utveckling efter gjutningen. I detta sammanhang är de olika icke förstörande testmetoderna ett bra alternativ till mer konventionella metoder.

Exempel på icke förstörande testmetoder som används i stor utsträckning inom betongforskningen är ultraljudsmätning och resonansfrekvensmätning som bl a tillämpas för bestämning av betongens dynamiska E-modul.

2.2.1 Standardmetoder för mätning av betongens dynamiska E-modul

De standardmetoder som beskrivs i såväl svenska som internationella normer gäller nästan uteslutande provningar med härdad betong.

I SS 13 72 40 beskrivs en svensk standard för mätning av ultraljudshastigheten i härdad betong som kan användas för bestämning av den dynamiska E-modulen.

Den amerikanska standarden för mätning av betongens dynamiska E-modul regleras i ASTM C 215-85. Enligt denna standard bestäms den dynamiska E-modulen genom resonansfrekvensmätning av provkroppar i form av cylindrar eller balkar med rektangulär tvärsnitt.

2.2.2. Mätmetod använd i denna undersökning

I den aktuella undersökningen bestämdes den dynamiska E-modulen genom att mäta provkropparnas fundamentala resonansfrekvens vid transversalsvängning. Provkropparna utgjordes av balkar med måtten 40×40×160 mm. Sambandet mellan transversal resonansfrekvens och dynamisk E-modul ges av följande uttryck /14/ :

$$E = C \times W \times f^2 \quad (2.1)$$

där

E =dynamisk elasticitetsmodul.

W =provkroppens vikt i kg.

f =resonansfrekvens i Hz

C =en faktor vars värde är beroende av provkroppens dimensioner, tvärkontraktionstalet, och svängningsmoden. I bilaga B1 redovisas formler för beräkning av denna faktor.

Mätutrustningen var en "Hewlett Packard 3582 A Spectrum analyser" som är ett relativt modernt mätinstrument med många finesser för bl a bestämning av materialegenskaper genom dynamiska mätningar. Valet av denna mätutrustning föregicks av en serie misslyckade förförsök med ett relativt gammalt mätinstrument. Under mätningen med det gamla mätinstrument fick man problem med bl a:

-identifiering av den fundamentala resonansfrekvensen.

-stor spridning mellan mätvärdena.

-ostabil mätuppställning. En liten ändring i mätuppställningen medförde stora variationer i de avlästa mätvärdena.

HP modell 3582 A har ett frekvensområde mellan 0 och 25 kHz. Detta frekvensområde uppdelas i ett antal mindre frekvensband. En kraftgivare, oscillator, som genererar den dynamiska lasten och en accelerometer, pic-up, som upptar responsen kopplas via förstärkare till apparaturen, se bild 1.

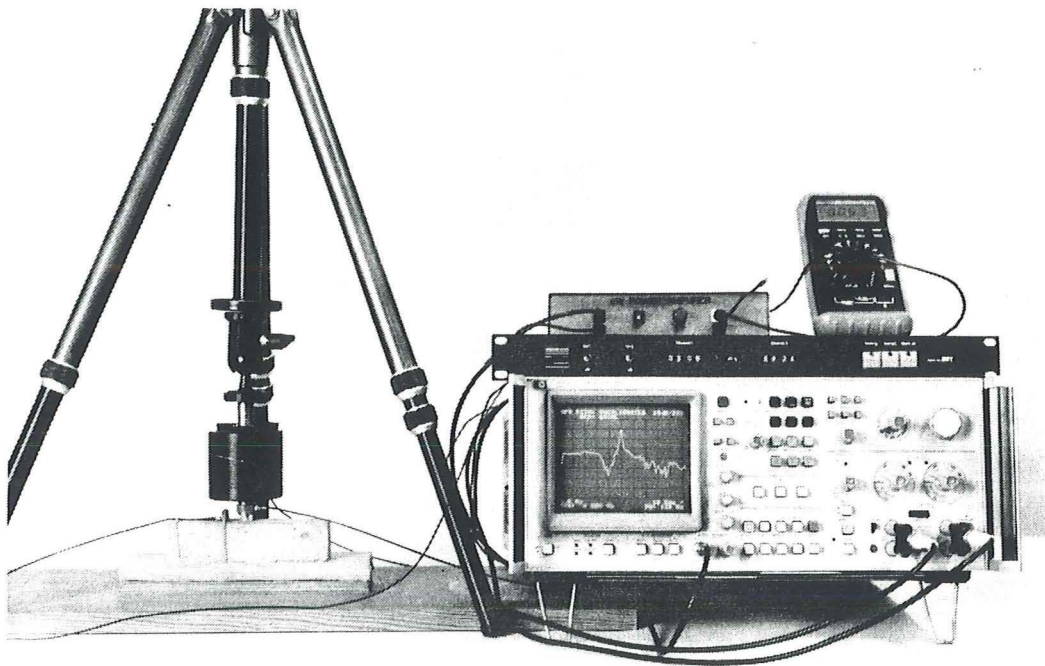


Bild 1. HP 3528 A och provuppställningen.

Vid mätningen väljer man först ett frekvensområde inom vilket man förväntar sig att den fundamentala resonansfrekvensen kan uppkomma. Därefter ökar man den dynamiska lastens styrka och börjar mätningen. Mätresultatet visas på skärmen i form av en kurva som visar amplituden hos den mekaniska admittansen, mobiliteten, som funktion av frekvensen. Mobiliteten är en styvhetsberoende egenskap och kan tolkas som ett mått på hur svängningsbenäget ett mekaniskt svängande system är, se bilaga B2.

2.2.3. Provutförande

Efter gjutningen täcktes gjutformarna av plastfolie och förvarades i klimatrums. Klimatrummet hade en relativ fuktighet på 60% och temperaturen 20°C.

Provkropparna avformades knappt 5 timmar efter gjutningen. Efter avformningen inplastades provkropparna och förvarades i klimatrums fram till provningstillfällena. Under första veckan efter gjutningen utfördes 18 mätningar varav 8 mätningar under de första 28 timmarna. Därefter genomfördes fram till dag 28 ytterligare 8 provningar. Tabellen nedan visar betongens ålder vid dynamiska provningar.

Tabell 1. Betongens ålder (timmar) vid försökstillfällena.

5,4	6,2	7	9,4	11,7	14,2	24,9	28,5	47,2	48,4
52,2	72,3	79,3	95,7	101,9	120,4	145,7	171	192,8	216,9
244,3	311,8	363,4	483,5	626,5	672,3				

Mätningarna utfördes utanför klimatrums i laboratoriemiljö. Mätningstiden för varje provkropp var ca 2 minuter. Figur 2 (sid 10) visar en schematisk bild av mätuppställningen. Mätningarna genomfördes på följande sätt:

- Provkroppens vikt bestämdes.
- Provkroppen (1) placerades liggande på en skumgummimatta (2). Kraftgivaren anbringades mot mitten av prismats övre yta med kraften parallellt med gjutriktningen (3). Det är viktigt att provkroppen inte belastas statiskt med kraftgivarens tyngd. Längs den längsgående symmetrilinjen, i direkt kontakt med prismats övre yta och med ett par centimeters avstånd från kraftgivaren, monterades en piezoelektrisk pic-up (4). Bättre kontakt mellan provkroppen och accelerometern skapades genom att använda silikonfett vid kontaktytan.

- Den frekvens vid vilken amplituden hos den mekaniska admittansen fick sitt maximivärde sattes till resonansfrekvensen.

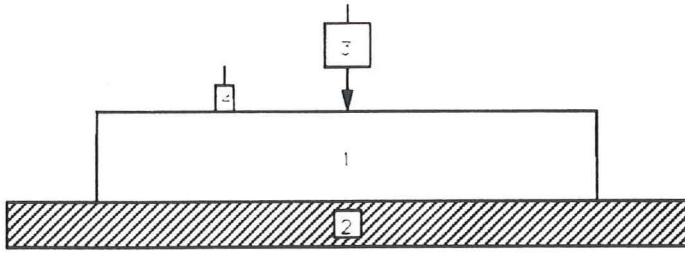


Fig. 2. Schematisk bild av provuppställningen för bestämning av dynamisk E-modul.

2.2.4. Materialets förlustfaktor

Förutom resonansfrekvensen bestämdes i denna undersökning materialets förlustfaktor. En provkropp som utsätts för fri svängning kommer så småningom att förlora en del av sin svängningsenergi. Detta sker på grund av materialets dämpningsegenskaper.

Som mått på den inre energiförlusten per svängningscykel definieras en faktor, det så kallade logaritmiska dekrementet, enligt följande:

$$\delta = \frac{1}{n} \times \ln \frac{A_0}{A_n} \quad (2.2)$$

där

δ = logaritmiska dekrementet [8].

A_0 = initiell amplitud.

A_n = amplitud efter n svängningar.

Alternativt kan man använda begreppet förlustfaktor η . Sambandet mellan förlustfaktorn och det logaritmiska dekrementet är:

$$\eta = \frac{1}{\pi} \times \delta \quad (2.3)$$

Det finns flera metoder för att bestämma förlustfaktorn η . I denna undersökning bestämdes förlustfaktorn genom att bestämma frekvensbredden på en amplitudnivå motsvarande hälften av amplituden vid resonansfrekvensen, se figur 3. Förlustfaktorn beräknas genom:

$$\eta = \frac{\Delta f}{f_0} \quad (2.4)$$

där Δf är frekvensbredden och f_0 är resonansfrekvensen.

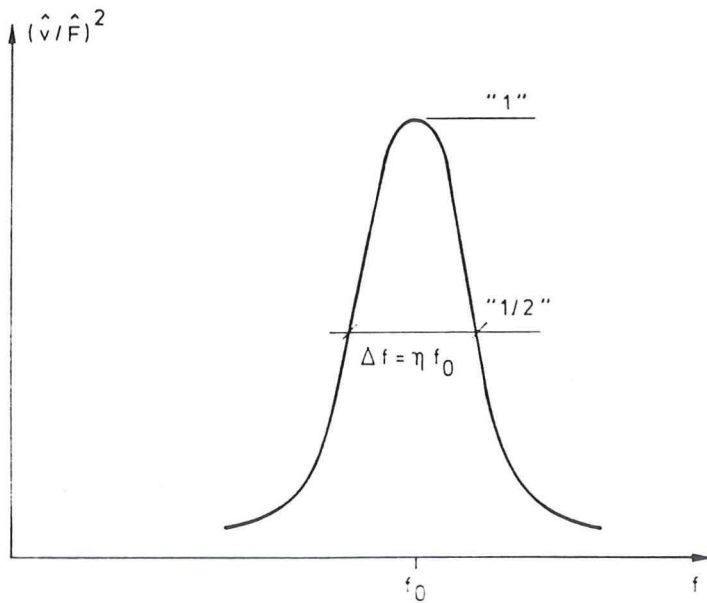


Fig.3. Metod för bestämning av materialets förlustfaktor. /9/.

2.3. Bestämning av statisk E-modul genom tryckprovning

Den svenska standarden för bestämning av betongens statiska E-modul regleras i SS13 72 32 . Enligt denna standard bestäms statisk E-modul för hårdnad betong genom tryckprovning av kubiska eller cylindriska provkroppar. Standarden föreskriver ett belastningsförlopp i två steg. Först belastas provkroppen till en bestämd spänningsnivå med efterföljande avlastning till en grundspänningsnivå. Därefter belastas provkroppen till brott.

I denna undersökning bestämdes den statiska E-modulen genom tryckprovning av cylindriska provkroppar med måtten \varnothing 100x200 mm. Provkropparna tillverkades av samma betongblandning som för de dynamiska mätningarna och förvarades i samma klimatrum. Under den första veckan efter gjutningen utfördes 15 provningar varav 6 mätningar under de första 28 timmarna. Därefter utfördes fram till dag 28 ytterligare 2 provningar. Mätningarna utfördes utanför klimatrummet i laboratoriemiljö. Tabell 2 visar betongens ålder vid statiska provningar.

Tabell 2. Betongens ålder(timmar) vid försökstillfällena.

5,1	8,5	11,1	13,8	24	28	31,9	35	47,9	51,5
58,7	71,7	80,7	96,6	137,4	340,1	671,6			

Provningarna genomfördes i provningsmaskinen "MTS 810 Material Test System", se bild 2. Belastningen påfördes deformationsstyrd i ett steg. Deformationshastigheten var 0,5 mm per minut. Denna deformationshastighet gav en belastningstid mellan 6 och 4 minuter beroende på betongens ålder.

För att kunna registrera deformationen tillverkades en mätram bestående av två aluminiumringar. Ringarna fixeras mot provkroppen med hjälp av tre fjädrande låssprintar, se bild 3. Låssprintarna trycks in, genom fjäderkraften, i tre ingjutna aluminiumdubbar med måtten \varnothing 5x10 mm. Mellan ringarna, med 120 graders mellanrum, monterades tre deformationsgivare av typ "LVDT Spring Return,AG 5".

Medelvärdet av de tre givarnas registrerade deformationer användes för att rita upp arbetskurvan. Avståndet mellan ringarna, d v s den effektiva mätlängden, var 100 mm.

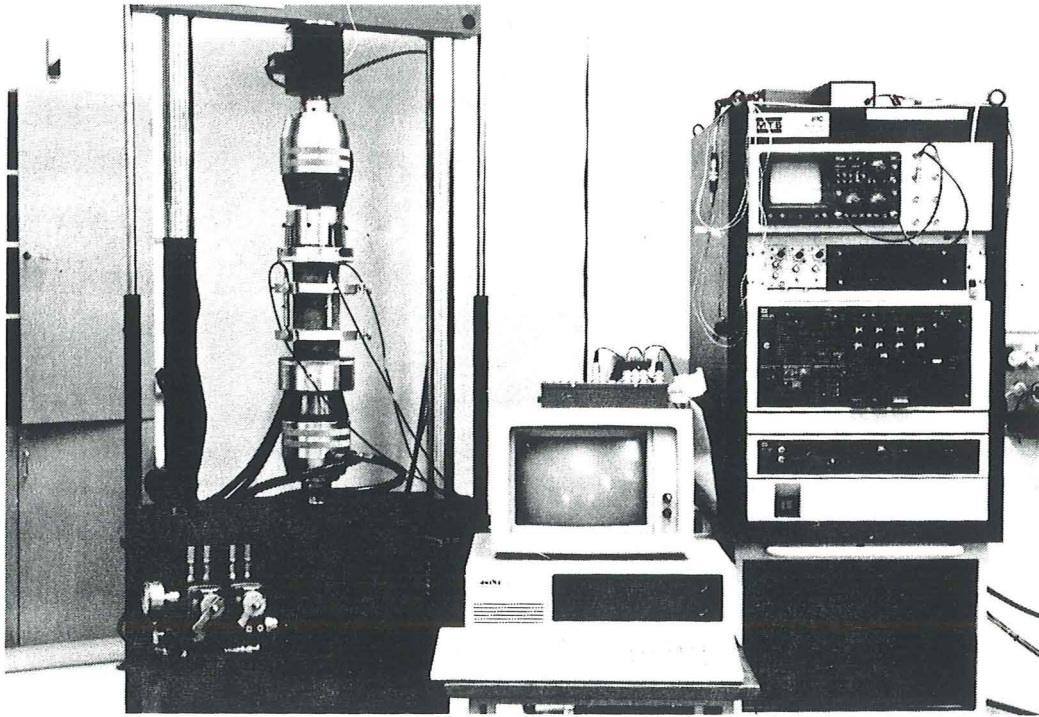


Bild 2. MTS 810 och provuppställningen.

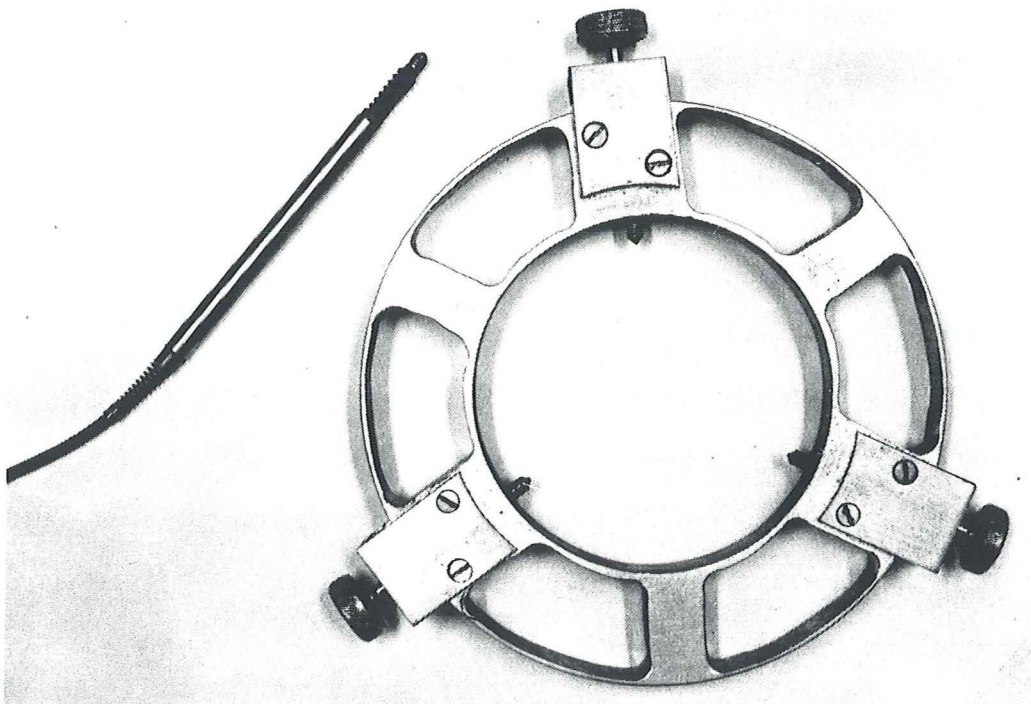


Bild 3. Aluminiumring och fjädrande låssprintar.

3. MÄTRESULTAT

I detta kapitel redovisas resultatet av de dynamiska och statiska provningarna. När det gäller den dynamiska E-modulen bestämdes den transversella resonansfrekvensen för tre provkroppar. Resultatet redovisas som medelvärdet av de tre mätningarna. Vid första mättillfället, dvs när betongen var drygt 5 timmar gammal, var det svårt att bestämma resonansfrekvensen. Svårigheten uppstod i samband med avläsning av resonansfrekvensen då resultatkurvan fick en ganska platt top vid sitt maximivärde. Orsaken till detta kan vara den höga dämpningen i färsk betong, se figur 12. Ca 7-8 timmar efter gjutningen, beroende på betongblandning, uppstod en klar resonans och man kunde avläsa resonansfrekvensen utan problem. Den dynamiska E-modulen beräknades genom att använda formel (2.1).

Den statiska E-modulen utvärderades dels genom att ta sekant-E-modulen mellan spänningsnivåerna 5-25%, och 0-30% av brottlasten och dels genom att ta tangent-E-modulen (medeltangent-modul) mellan samma spänningsnivåer. Medeltangent-E-modulen utgör lutningen hos den räta linje som med hjälp av minsta kvadratmetoden bäst anpassades till de ovan angivna spänningsnivåerna (regressionsmetod). Beräkningarna genomfördes med hjälp av dator. Hållfasthetstillväxten för respektive blandning bestämdes i förväg genom tryckprovning av tre cylindriska provkroppar vid olika ålder, se figur 1 och 2 i bilaga E. En jämförelse mellan tangent och sekant-E-modulen vid respektive spänningsnivåer framgår av figurerna 7 och 8 i bilaga E.

En granskning av datafilerna visade att, vid enstaka mättillfällen, mätvärdena från de tre givarna hade stor avvikelse från varandra, se bilaga C1. Möjliga orsaker till detta kan vara:

-fel vid mätningen som t ex felaktig montering av ringarna.

-provkroppens avvikande deformationsegenskaper i olika delar av tvärsnittet.

Detta medförde att de uppmätta statistiska E-modulvärdena vid dessa mättillfällen fick antingen för stora eller för små värden. Antalet provkroppar som uppvisade dessa fel var 3 resp 1 för försöksserierna med standard- resp anläggningcement. Figurerna 4-12 visar resultatet av mätningarna grafiskt. Dessutom redovisas mätresultaten i grafisk-och tabellform i bilaga E. Förkortningarna STD och ANL står för blandningar med standard respektive anläggningcement.

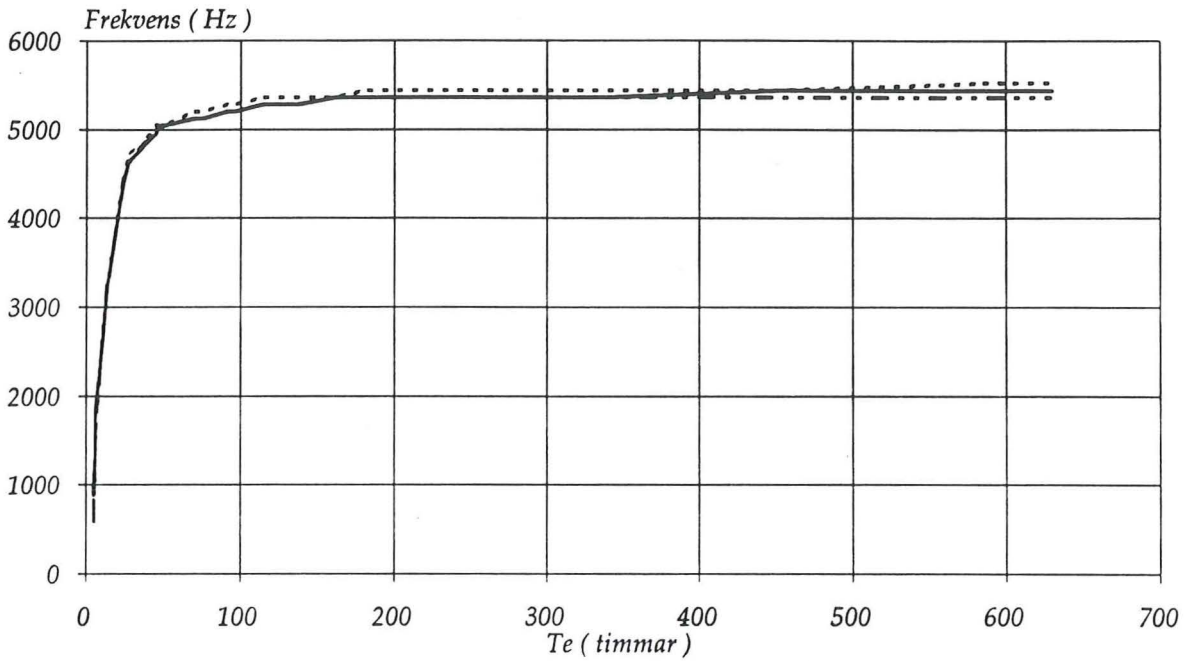


Fig.4. Uppmätt resonansfrekvens för tre provkroppar. STD.

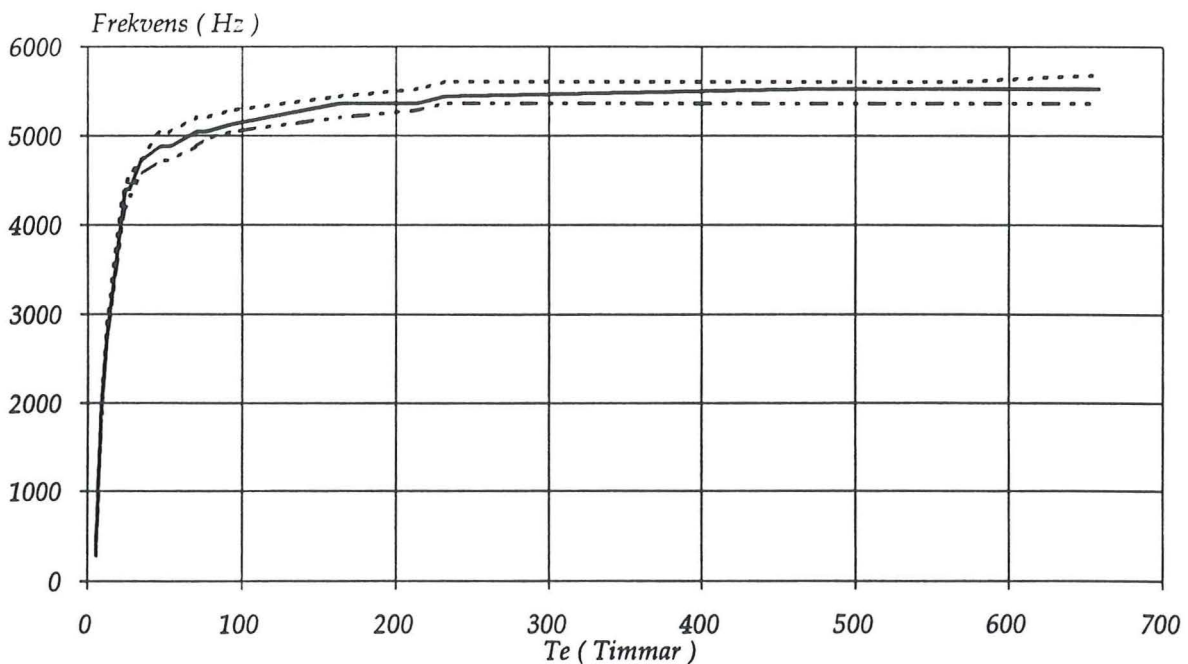


Fig.5. Uppmätt resonansfrekvens för tre provkroppar. ANL.

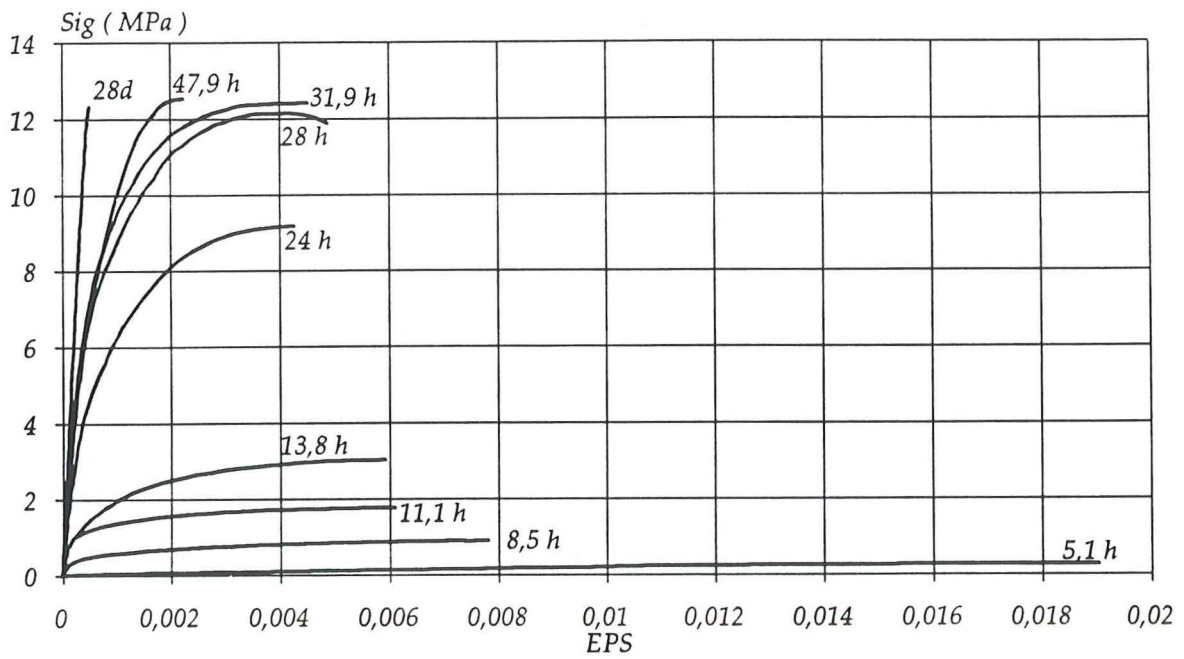


Fig.6. Arbetskurvor från statistiska mätningar. STD.

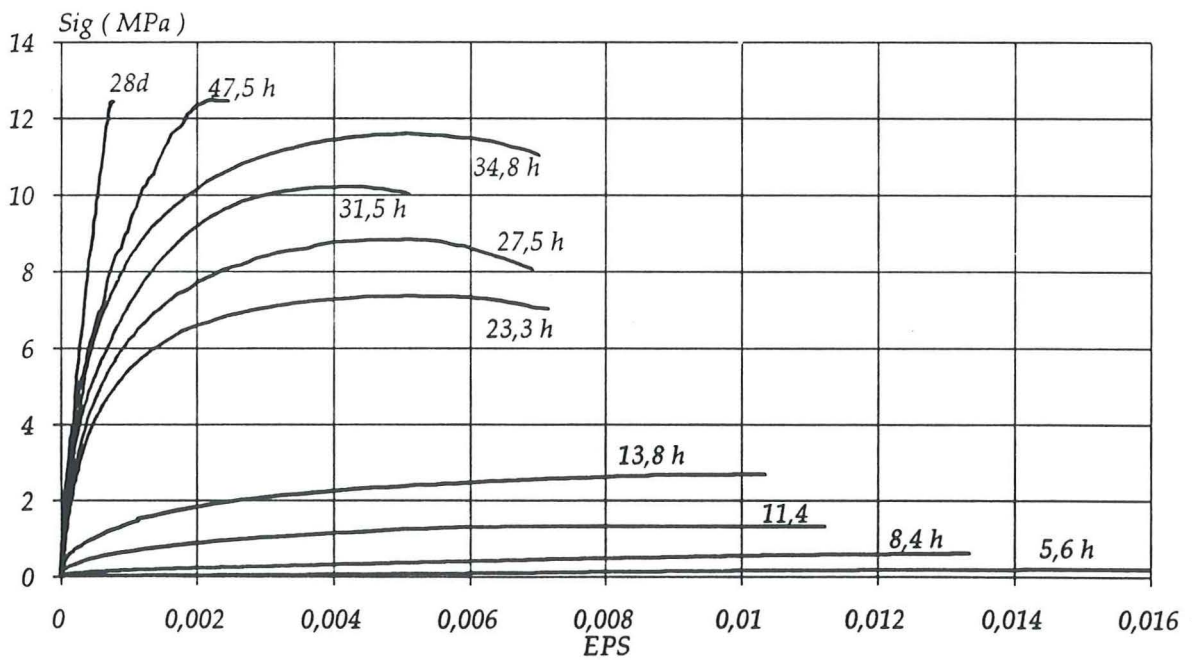


Fig.7. Arbetskurvor från statistiska mätningar. ANL.

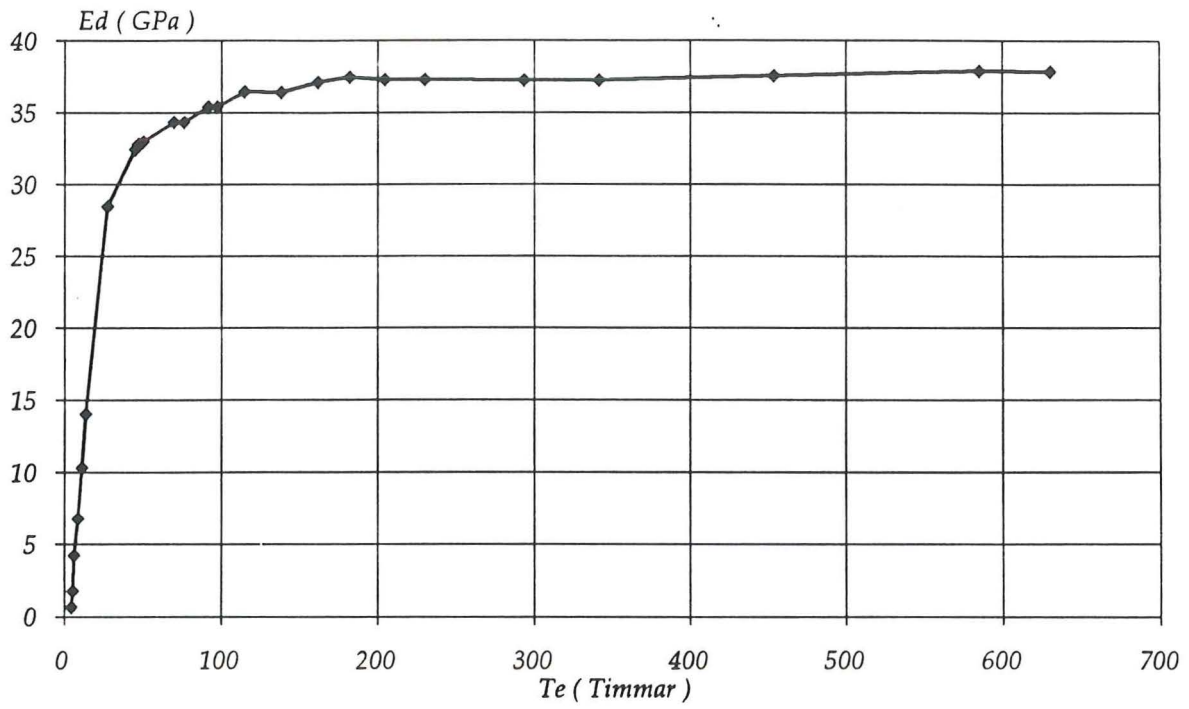


Fig.8. Dynamiska E-modulens tillväxt med tiden. STD.

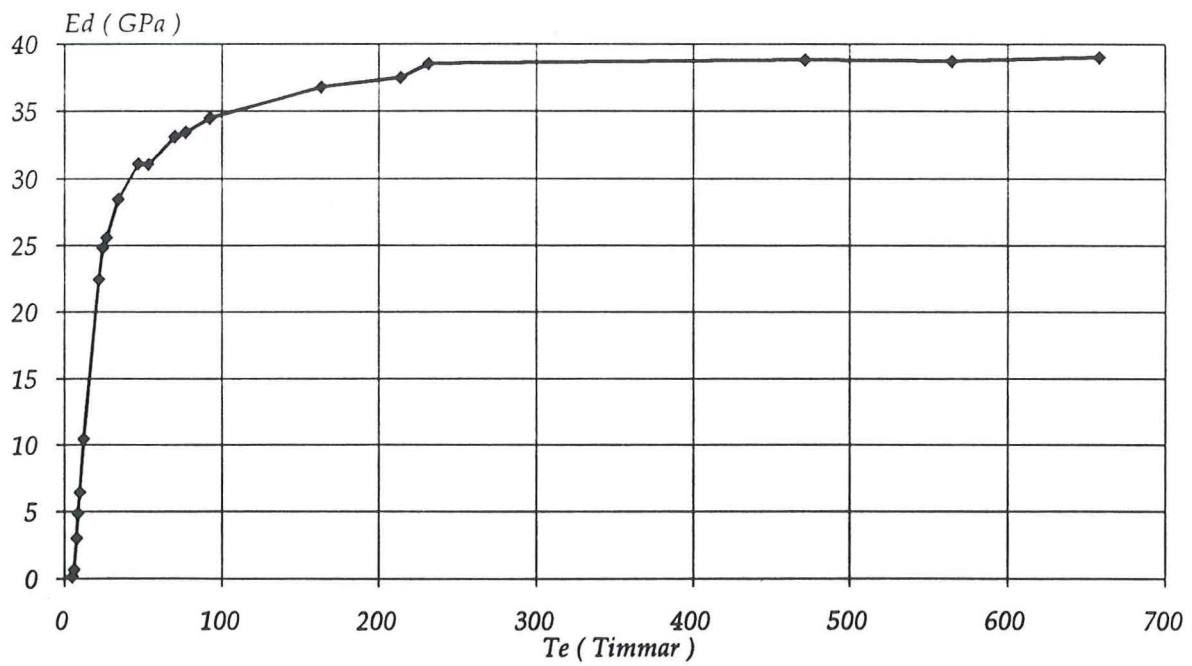


Fig.9. Dynamiska E-modulens tillväxt. ANL.

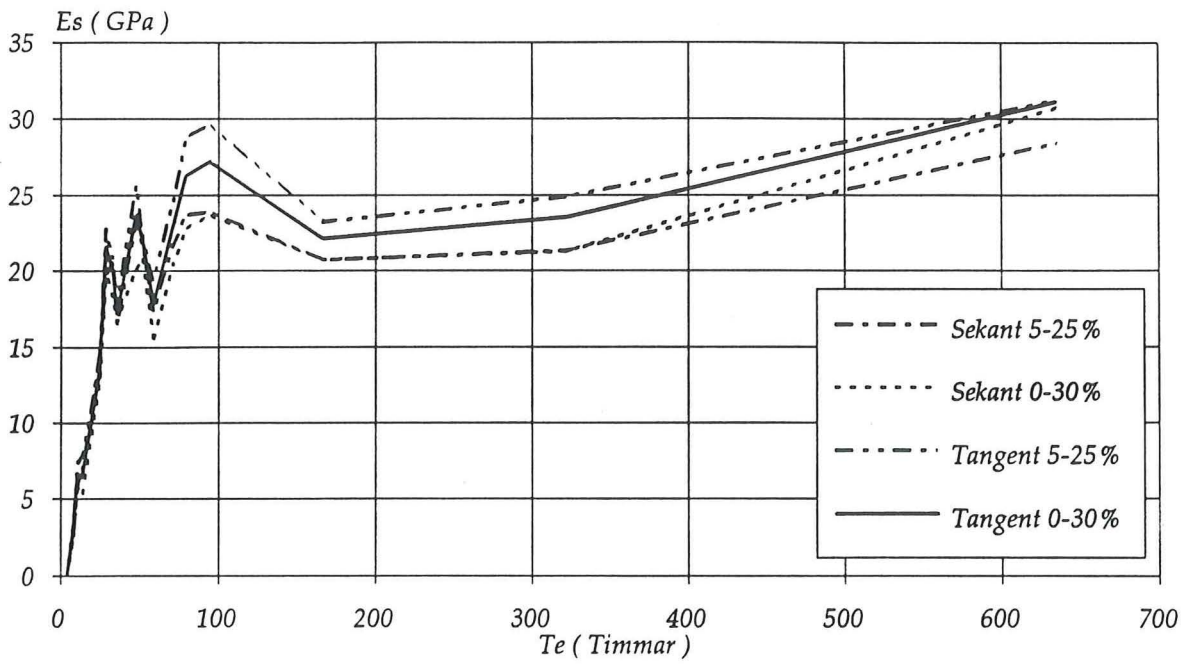


Fig.10. Statiska E-modulens tillväxt med tiden. STD.

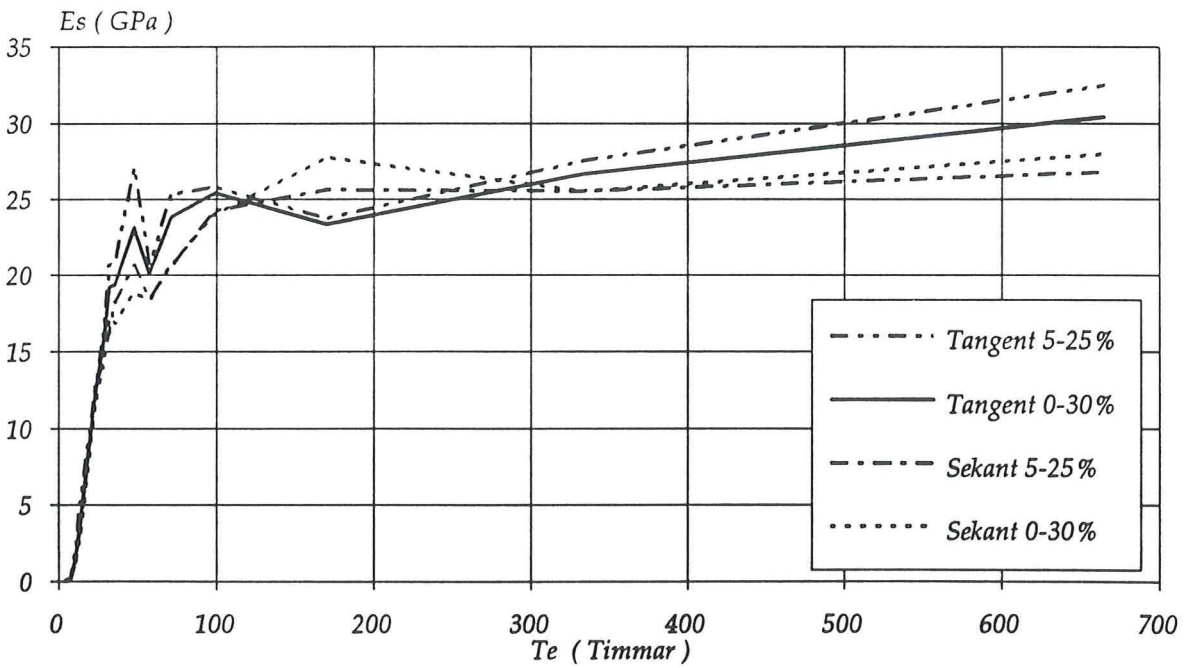


Fig.11. Statiska E-modulens tillväxt med tiden. ANL.

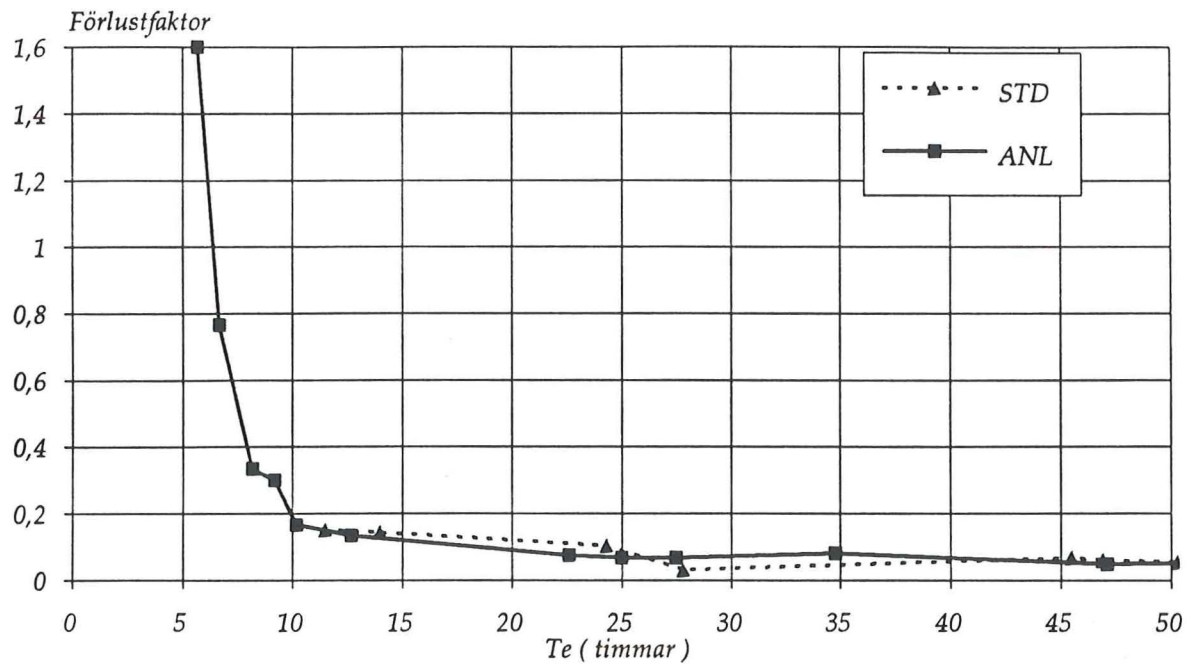


Fig.12. Materialets förlustfaktor som funktion av tiden.

3.1. Jämförelse av de uppmätta E-modulsvärden

I detta avsnitt jämförs de uppmätta dynamiska- och statiska E-modulvärdena. Eftersom den dynamiska och statiska E-modulen bestämdes genom att använda två olika typer av provkroppar mognadsanpassades mätresultaten för att kunna jämföra de med varandra. Mognadsanpassningen genomfördes genom att fortlöpande mäta betongtemperaturen under härdningen i tre balkar resp cylindrar och sedan bestämma cementpastans s k relativa reaktionshastighet under bestämda tidsintervaller. Metoden beskrivs i /12/. Temperaturkurvorna framgår av figur 3 och 4 i bilaga E.

En av de faktorer som har stor inverkan på mätningen av den statiska E-modulen är betongens krypning. Krypningen definieras som tidsberoende deformation under last. Betong påverkas av krypningen redan vid mycket korta belastningstider. Krypeffekten är störst när betongen är ung vilket betyder att betongens statiska E-modul vid tidig ålder avviker mycket från den "verkliga E-modulen"

Således kan man, beroende på belastningstiden, uppmäta olika E-modul för provkroppar tillverkade av samma betongblandning. Enligt Neville medför en ökning av belastningstiden från 5 sekunder till 2 minuter en ökning av deformationen upp till 15%. Men ytterligare ökning av belastningstiden från 2 minuter till 10 eller även 20 minuter medför ingen nämnvärd ökning i deformationen /4/.

Betongens dynamiska E-modul är, till skillnad från den statiska E-modulen, fri från inverkan av krypdeformationen. Detta medför att den dynamiska E-modulen blir större än den statiska. Normalt är denna skillnad för hårdnad betong upp till 20%.

Eftersom den dynamiska E-modulen bestäms vid mycket låga spänningsnivåer är det lämpligt att jämföra den med origotangent-E-modulen. Vid den aktuella undersökningen bestämdes origotangent-E-modulen vid spänningsnivån 0-30% av brottlasten (medeltangent-modul). Figur 13 och 14 visar förhållandet mellan den statiska och dynamiska E-modulsvärdena för de provade betongrecepten vid denna undersökning. Som framgår av figurerna är skillnaden mellan de två E-modulvärdena stor vid ett mycket tidigt skede efter

gjutningen. Detta gäller speciellt för betongblandningen tillverkad av anläggningscement.

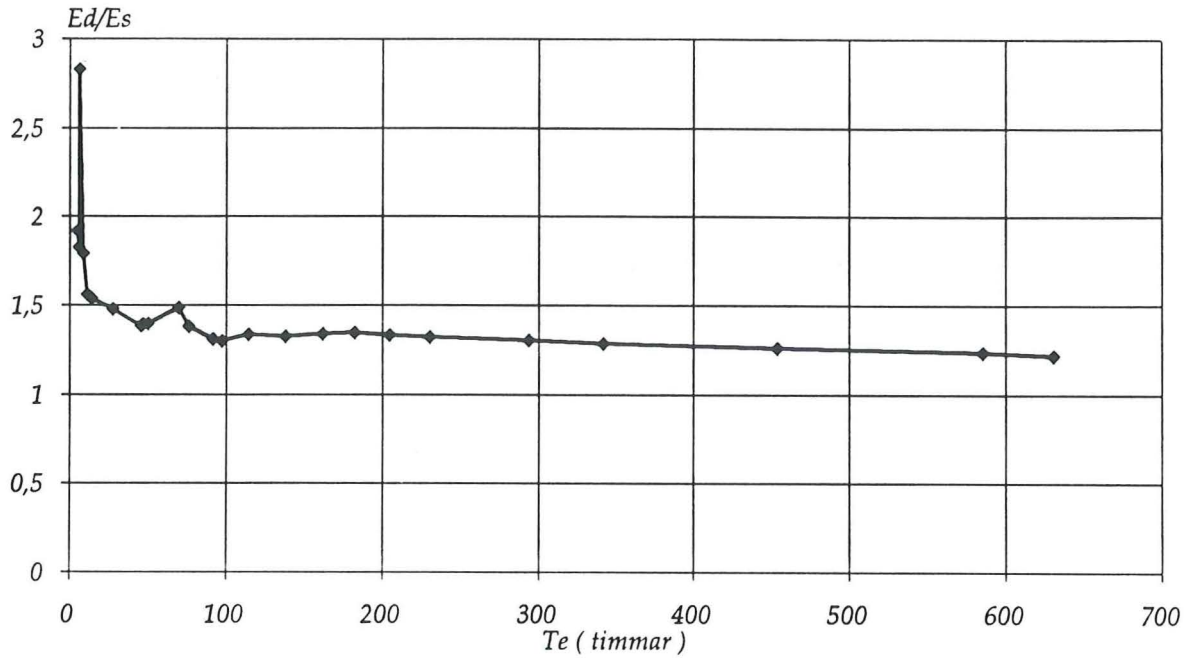


Fig.13. Förhållandet mellan den dynamiska och statiska E-modulen. STD.

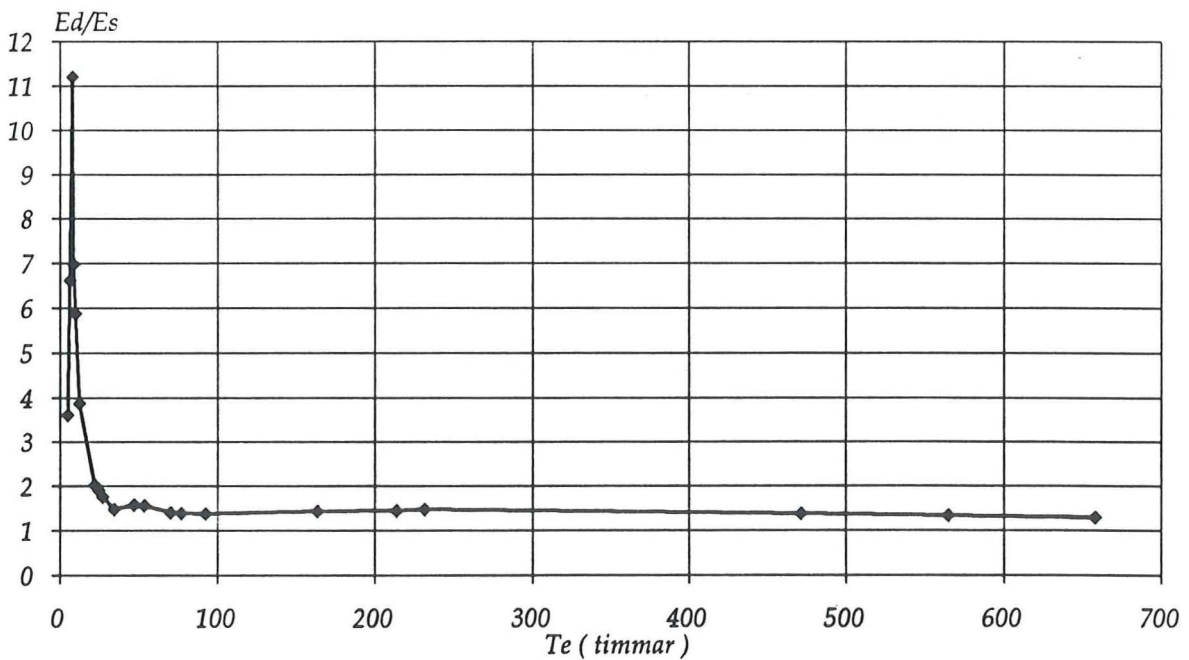


Fig.14. Förhållandet mellan den dynamiska och statiska E-modulen. ANL.

3.2. Teoretisk samband mellan betongens dynamiska och statiska E-modul

Sambandet mellan betongens statiska och dynamiska E-modul ges av:

$$E_s = \frac{E_d}{1 + \varphi(t, t_0)} \quad (3.1) \quad /1/ \text{ och } /10/$$

där $\varphi(t, t_0)$ är materialets krypkoefficient vid belastningsåldern t_0 och belastningstiden $t - t_0$.

Krypkoefficienten definieras som förhållandet mellan krypdeformationen, efter en viss belastningstid, och den momentana deformationen. Krypkoefficientens åldersberoende kan lämpligen uttryckas enligt sambandet nedan /1/:

$$\varphi_{t_0} = \frac{\varphi(t, t_0)}{\varphi(t, t_0 = 28d)} \quad (3.2)$$

där φ_{t_0} är en korrektionsfaktor som tar hänsyn till krypkoefficientens åldersberoende vid en given belastningsålder. Enligt Byfors är effekten av olika vct, proportionering och belastningstid på krypkoefficientens åldersberoende försumbar /1/. Figur 2 i bilaga C2 visar φ_{t_0} som funktion av kvoten mellan den aktuella tryckhållfastheten och tryckhållfastheten vid 28 dagar. Fallet gäller för betong tillverkad av standardcement.

Det teoretiska sambandet mellan den dynamiska och statiska E-modulen kan således skrivas:

$$E_s = \frac{E_d}{1 + \varphi_{t_0} \times \varphi(t, t_0 = 28d)} \quad (3.3) \quad /1/$$

Med antagandet att den dynamiska E-modulen, vid 28 dagar efter gjutningen och under en konstant härdningstemperatur på 20°C, är ca 20% högre än den statiska fås:

$$E_s = \frac{E_d}{1 + \varphi_{t_0} \times 0,2} \quad (3.4)$$

Den heldragna kurvan i figur 15 visar den statiska E-modulens tillväxt beräknad enligt ekvation (3.4). Beräkningen genomfördes för betongblandningen tillverkad av standardcement. De uppmätta dynamiska E-modulvärdena användes som ingångsparametrar för beräkningen. φ_{t_0} uppskattades enligt figur 2 i bilaga C2.

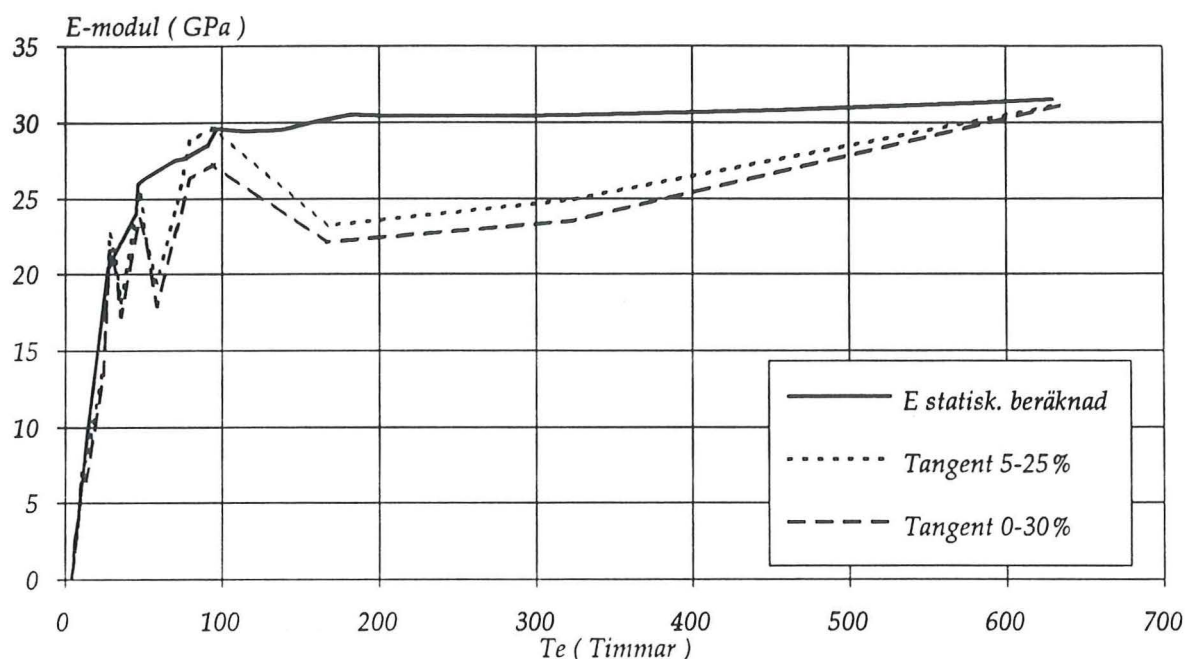


Fig.15. Jämförelse mellan den beräknade och de i laboratorie uppmätta statistiska E-modulvärdena.

Som framgår av figuren visar den beräknade statistiska E-modulen och de uppmätta tangent-E-modulvärdena en mycket bra överensstämmelse speciellt under den kraftiga tillväxtperioden. Modellen enligt ekvation (3.4) kan således, med förutsättningen att krypkoefficientens åldersberoende är känd för olika cementtyper, tillämpas för att beskriva sambandet mellan dynamisk och statisk E-modul även för några timmar gammal betong.

4. TEORETISK MODELL FÖR UPPSKATTNING AV BETONGENS E-MODULSTILLVÄXT

I detta kapitel beskrivs en teoretisk modell för uppskattning av betongens E-modul och dess tillväxt med tiden.

Modellen bygger på betongens egenskaper som ett tvåfasmaterial. Enligt en förenklad matematisk modell beräknas betongens elasticitetsmodul E_c av sambandet nedan /12/.

$$E_c^n = V_b \times E_b^n + V_p \times E_p^n \quad (4.1)$$

där

V_b och E_b är ballastens volymandel resp E-modul.

V_p och E_p är cementpastans volymandel resp E-modul.

n är en faktor som bestäms enligt avsnitt 4.3 i detta kapitel.

Innan betongen är fullständigt hårdnad ändras E-modulen med tiden och formel (4.1) kan omformuleras enligt följande:

$$E_c^n(t, \theta) = V_b \times E_b^n + V_p \times E_p^n(t, \theta) \quad (4.2)$$

där t och θ är tiden resp härdningstemperaturen.

Genom att bestämma de två fasernas E-modul och bestämma n kan man alltså beräkna den sammansatta E-modulen.

4.1. Utvärdering av cementpastans E-modulstillväxt

Sambandet nedan gäller för beräkning av cementpastans E-modul, se /12/.

$$E_p = a \times \kappa^b \quad (4.3)$$

där a och b är koefficienter som beror på cementkvaliten. I regel är värdet för koefficienten b ca 2,5. κ är materialets gel-space ratio som är förhållandet mellan gelens volym inklusive porer och tillgängligt utrymme för gelen, se /12/. Med hänsyn till E-modulens åldersberoende modifieras sambandet ovan till:

$$E_p(t, \theta) = a \times \kappa^b(t, \theta) \quad (4.4)$$

$$\kappa(t, \theta) = \frac{2,84 \times \frac{W_n}{c}(t, \theta)}{\frac{W_0}{c} + 1,28 \times \frac{W_n}{c}(t, \theta)} \quad (4.5)$$

$$\frac{W_0}{c} = \text{vattencementalet}$$

$$\frac{W_n}{c}(t, \theta) = \text{kemiskt bundet vatten per viktenhet cement}$$

$$\frac{W_n}{c}(t, \theta) = h(t, \theta) \times \left(\frac{W_0}{c}\right)^{\frac{2}{3}} \quad (4.6)$$

där $h(t, \theta)$ är en faktor som är beroende av cementtyp och hydrations Temperaturen /11/.

Genom att bestämma konstanten a för varje cementtyp och κ :s värde vid olika mognadsgrader kan man alltså bestämma cementpastans E-modultillväxt med tiden.

4.2. Ballastfasens E-modul

Ballastfasens E-modul är bestämd för olika ballasttyper och förblir konstant under betongens mognadstillväxt.

4.3. Exponenten n

Teorin bakom metod för val av exponenten n beskrivs i /12/. Värden för n som funktion av förhållandet mellan pastafasens E-modul och ballastens E-modul fås av figuren nedan.

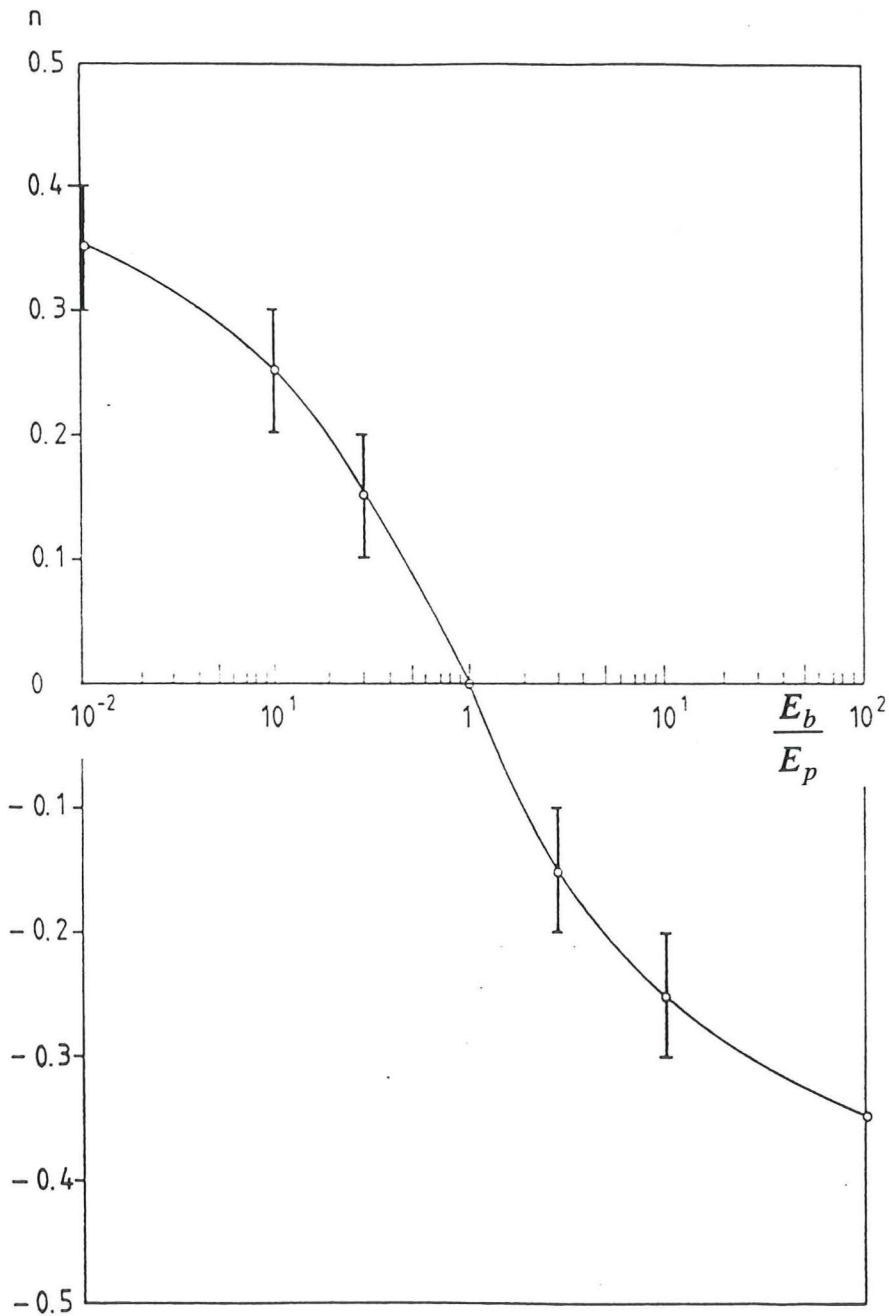
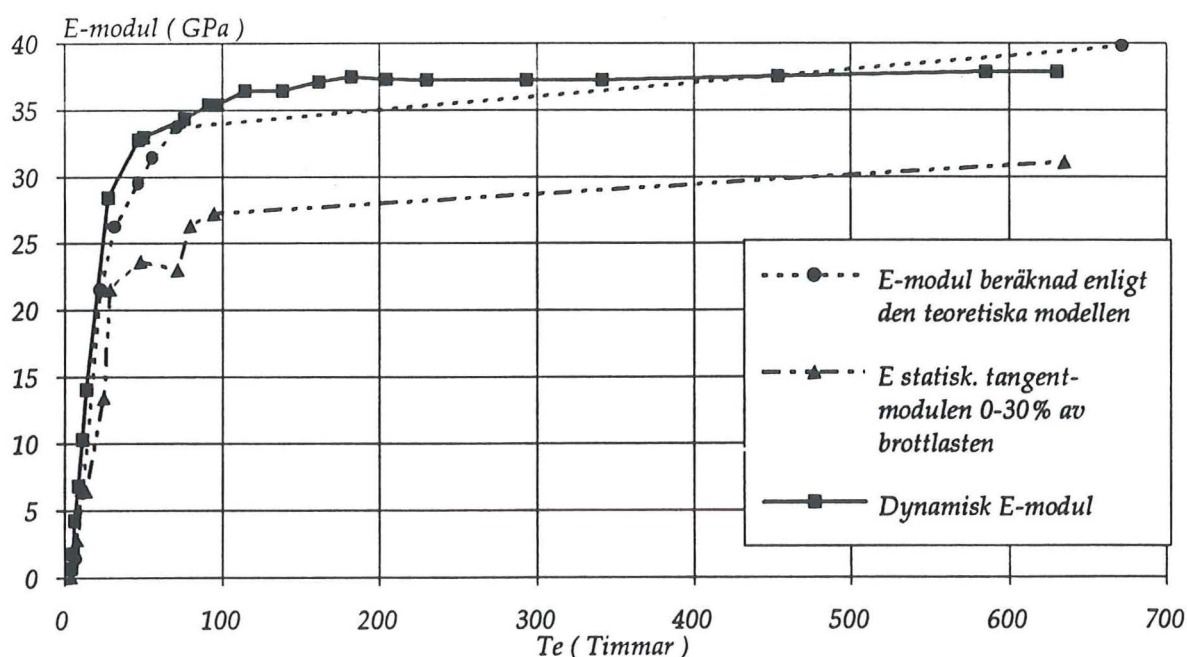


Fig 16. Lämpliga värden på exponenten n i ekvation (4.1)

4.4. Modellens tillämpning

I denna avsnitt tillämpas modellen för uppskattning av E-modulen och dess tillväxt med tiden. Beräkningen genomförs för betongblandningen tillverkad av standardcement. Sedan jämförs de teoretiskt beräknade E-modulvärdena med de uppmätta E-modulvärdena. Den typ av ballastmaterial som användes för tillverkning av betongen antas ha en elasticitetsmodul på 50 GPa. Exponenten n utvärderades med hjälp av figur 16. Utgångspunkten för beräkningen är ekvation (4.4). Koefficienten a 's värde för cementpasta tillverkad av standardcement beräknas till 52,7, se bilaga D1. För att kunna bestämma $\kappa(t, \theta)$ i (4.4) måste man känna mängden kemiskt bundet vatten vid olika mognadstider. I det aktuella fallet utnyttjades värden från tabell 1 i bilaga D2. För betong med vct som avviker från vct angivna i tabellen kan mängden kemiskt bundet vatten bestämmas genom att linjär interpolera mellan tabellvärdena, se figur 1 bilaga D2.

Resultatet av E-moduluppskattningen enligt den teoretiska modellen visas i figur 17 tillsammans med E-modulkurvorna från laboratorieprovningarna. Som framgår av figuren visar den teoretiskt uppskattade E-modulen en mycket bra överensstämmelse med den dynamiska E-modulen. De två E-modulerna visar i princip samma tillväxttendens.



Figur 17. De uppmätta dynamiska och statiska E-modulen samt E-modul beräknad med den teoretiska modellen.

5. SLUTSATSER

Resonansfrekvensmetoden kan med mycket bra resultat tillämpas för bestämning av betongens dynamiska elasticitetsmodul vid tidig ålder. Metoden fungerar mycket bra när dämpningen i materialet inte är för högt, för de aktuella betongrecepten i denna undersökning 7-8 timmar efter gjutningen. Jämfört med bestämning av den unga betongens statiska E-modul är mätningen av den dynamiska E-modulen lättare att utföra praktiskt.

Skillnaden mellan den dynamiska och statiska E-modulen är mycket stor vid ett tidigt skede efter gjutningen men minskar snabbt med ökande ålder. Ca 9 och 30 timmar efter gjutningen visade sig den dynamiska E-modulen vara ca 60% större än den statiska för betong tillverkad av standard respektive anläggningcement. Modellen beskriven i avsnitt 3.2 beträffande sambandet mellan betongens statiska och dynamiska E-modul provades genom att använda de uppmätta statiska och dynamiska E-modulvärdena för blandningen tillverkad av standardcement. Resultatet visar en mycket bra överensstämmelse mellan teori och laboratorievärden, även för några timmar gammal betong. Belastningstid, vct och betongblandning påverkar inte krypkoefficientens åldersberoende /1/ vilket betyder att sambandet mellan den relativa hållfasthetsutvecklingen och krypkoefficienten som framgår av figur 2 i bilaga C2 är giltig för olika vct och blandningar (fallet gäller för betong tillverkad av standardcement). Genom att mäta den dynamiska E-modulen och tillämpa denna modell kan man således, med förutsättningen att krypkoefficientens åldersberoende är bestämd, bestämma den statiska E-modulens tillväxt med ökande ålder.

E-modul uppskattad enligt den teoretiska modell som beskrivs i kapitel 4 visar mycket bra överensstämmelse med de uppmätta dynamiska E-modulvärden. Förutsättningen för att kunna använda denna modell som ett alternativ till laboratorieprovningar är att för olika cementtyper:

- bestämma konstanten a i ekvation (4.4)
- bestämma det kemiskt bundna vattnets variation med mognadstillväxt.

REFERENSER

- /1/. Byfors, J. Plain Concrete at Early Ages.
CBI forsknings research Fo 3:80, 1980.
- /2/. Emborg, M. Thermal Stresses in Concrete Structures at Early Ages.
Doctoral tesis, 1989:73 D.
Division of Structural Engineering, Luleå University of Technology, 1989.
- /3/. Nagy, Agnes & Thelandersson, Sven . Modelling Thermal Effects in Young Concrete, report TVBK-7039
Department of Structural Engineering, Lund Institute of Technology
- /4/. Neville, A M. Properties of concrete
3rd edition, 1981.
- /5/. Morse, Ph.M. Vibration and sound.
American Institute of Physics for The Acoustical Society of America,
1986.
- /6/. Trampe Broch, Jens. Mechanical Vibrations and Shock Measurements.
1984.
- /7/. Lew, H.S. Nondestructive Testing.
American Concrete Institute, Detroit, 1988.
- /8/. Jones, R. Nondestructive Testing of Concrete.
Cambridge University, 1962.
- /9/. Lindblad, S. Akustik för V TVBA-3074.
Avdelningen för Teknisk Akustik.
- /10/. Fagerlund, G. Betongs slaghållfasthet.
CBI forskning research Fo 4:79, 1979.
- /11/. Fagerlund, G. Influence of Slagcements on the Frost Resistance of the Green Concrete.
CBI forskning research Fo 3.83, 1983.

/12/. Kompendium i byggnadsmateriallära FK, LTH, 1992

/13/. Svensk byggtjänst. Betonghandboken, Material, 1982.

/14/. ASTM volum 04.02 Concrete and Aggregates, 1989

BILAGA. A. Betongrecept

Tabellen nedan redovisar de betongrecept som användes vid provningarna.

Tabell 1. Betongrecept.

		STD(*)	ANL(*)
vct		0,61	0,54
Standardcement	(1) $\frac{kg}{m^3}$	272,0	-
Anläggningcement	(2) $\frac{kg}{m^3}$	-	300,7
Vatten	$\frac{l}{m^3}$	166,0	162,3
sand 0-4mm	$\frac{kg}{m^3}$	900,0	881,0
Makadam 0-8mm	$\frac{kg}{m^3}$	922,0	986,0

(1). Slite standardcement.

(2). Degerhamn anläggningscement.

(*). Förkortningarna STD och ANL står för betongblandningar med standard respektive anläggningcement.

BILAGA. B

B1. Faktorn C i formel (2.1)

Faktorn C för prisma resp cylinder i transversalsvängning beräknas av:

$$C = K \times \frac{l^3}{bh^3} \times T \quad \text{prisma med längden } l \text{ och tvärsnitt } b \times h$$

$$C = K \times \frac{l^3}{d^4} \times T \quad \text{cylinder med diameter } d$$

K är en konstant vars värde beror på provkroppen och svängningsmoden.

$K=0,947$ Prisma i transversal svängning.

$K=1,603$ cylinder "

T är en korrektionsfaktor som är beroende av materialets tvärkontraktionstal ν , provkroppens tröghetsradie R och dess längd l . Tröghetsradie för cylinder resp prisma är:

$$R = \frac{d}{4} \quad \text{cylinder med diameter } d$$

$$R = \frac{h}{\sqrt{12}} \quad \text{prisma med tvärsnitt } b \times h$$

Tabell 1 i denna bilaga ger T 's värde för olika förhållande mellan tröghetsradien och provkroppens längd. Värdena gäller för tvärkontraktionstalet $\nu=0,16$. För andra tvärkontraktionstal kan en ny korrektionsfaktor beräknas genom att multiplicera tabellvärdena med följande faktor /14/:

$$T' = T \times \frac{1 + (0,26\nu + 3,22\nu^2) \times \frac{R}{l}}{1 + 0,1328 \times \frac{R}{l}}$$

Den unga betongens tvärkontraktionstal mättes inte i denna undersökning. Däremot utvärderades tvärkontraktionstalet dels genom att använda ett hypotetiskt samband mellan ålder och det dynamiska tvärkontraktionstalet och dels genom att använda sambandet mellan tvärkontraktionstalet och tryckhållfastheten som framtagits av Byfors /1/. Se figur 2.

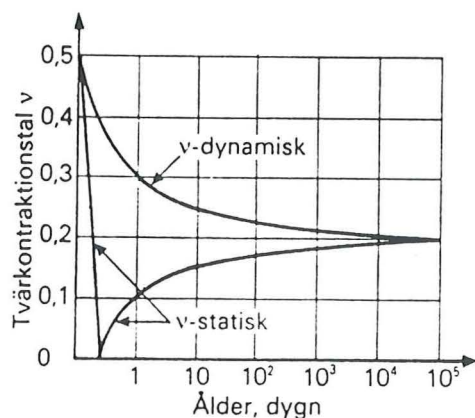


Fig.1. Tvärkontraktionstalet som funktion av ålder /13/.

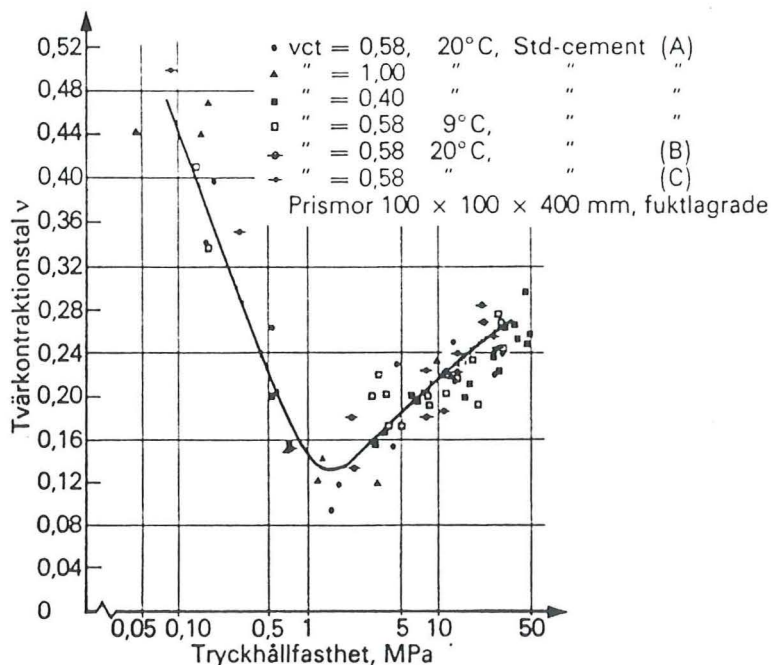


Fig.2. Tvärkontraktionstalet som funktion av hållfastheten. /13/.

Figur 3 visar att den dynamiska E-modulen inte påverkas nämnvärt av metodvalet för uppskattning av den unga betongens tvärkontraktionstal. Även fallet med konstant tvärkontraktionstal, $\nu=0,16$, visas i figuren.

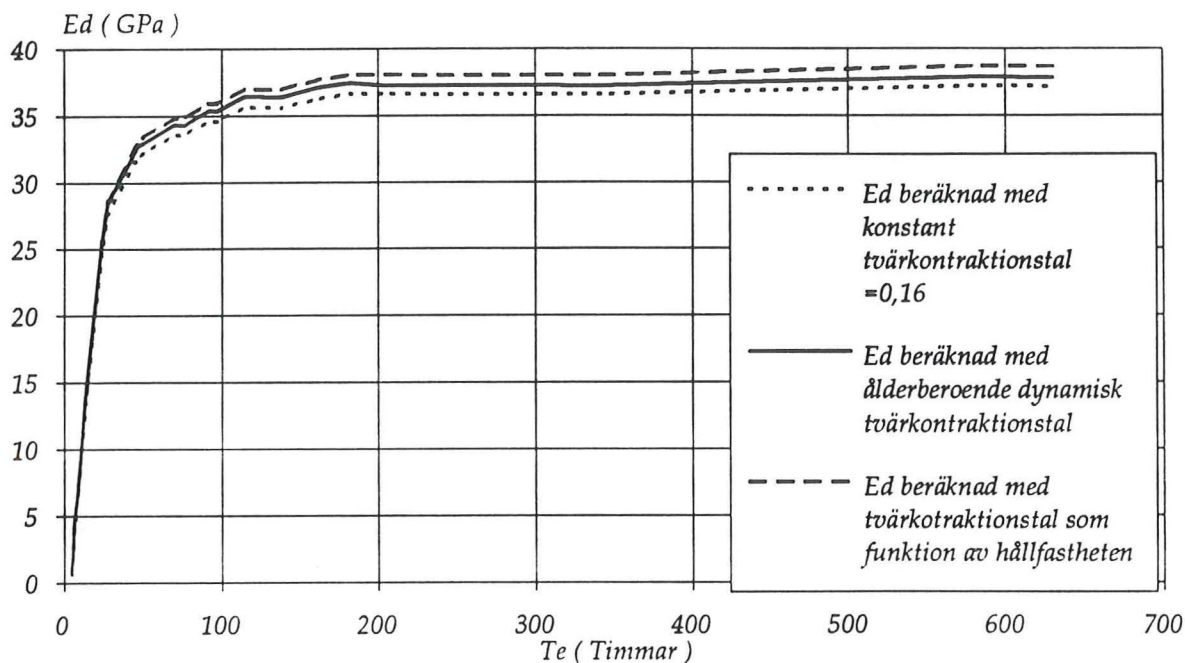


Fig.3. Dynamisk E-modul beräknad med olika tvärkontraktionstal.

Tabell.1. Korrektionsfaktorn T . Värdena gäller för $\nu=0,16$

$\frac{R}{l}$	T	$\frac{R}{l}$	T
0,00	1,00	0,09	1,60
0,01	1,01	0,1	1,73
0,02	1,03	0,12	2,03
0,03	1,07	0,14	2,36
0,04	1,13	0,16	2,73
0,05	1,20	0,18	3,14
0,06	1,28	0,20	3,58
0,07	1,38	0,25	4,78
0,08	1,48	0,30	6,07

B2. Mekanisk admittans

Den mekaniska admittansen, mobiliteten, är en styvhetsberoende egenskap och definieras som kvoten mellan hastighet och kraft, m/Ns.

$$Y = \frac{V}{F} = \sum \frac{\sin^2\left(\frac{n\pi}{l} \times X\right)}{\omega_n^2 - \omega^2} \approx \sum \frac{1}{\omega_n^2 - \omega^2}$$

där

V = komplex hastighet.

F = komplex kraft.

ω = vinkelfrekvensen. $\omega = 2\pi \times f$.

ω_n = den naturliga vinkelfrekvensen. Vid resonans blir $\omega = \omega_n$.

X = hälften av balklängden för provkropp i transversal svängning med kraft applicerad i mitten.

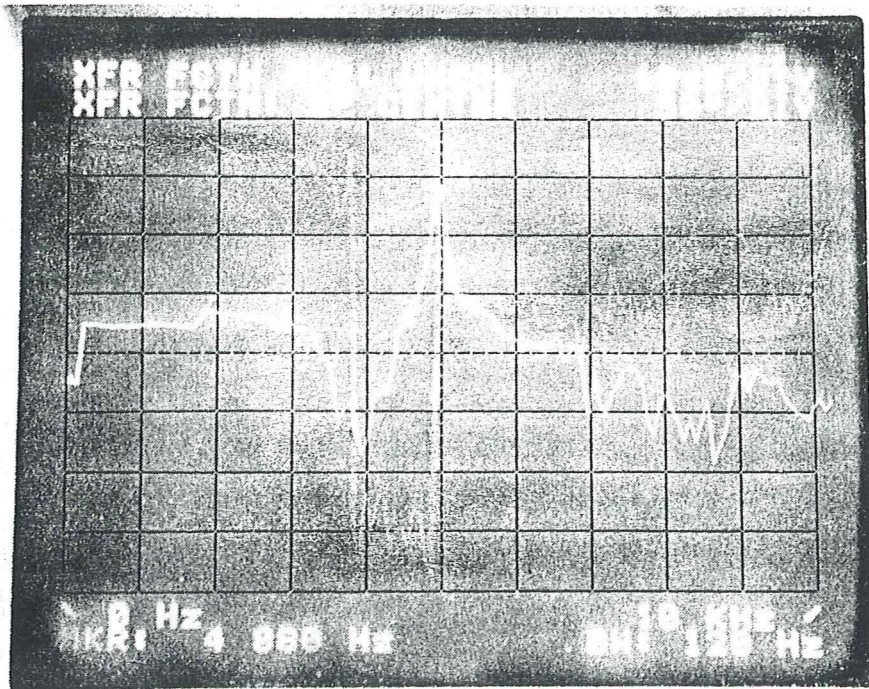


Bild 1. Mekaniska admittans som funktion av frekvens.

BILAGA. C

C1. En granskning av datafilerna från de statistiska mätningarna visade att vid enstaka mätningar mätvärdena från de tre givarna hade stor avvikelse från varandra. Problemet förekom när betongens hållfasthet blev högre än 12 MPa. Figuren nedan visar exempel på avvikelse mellan givarna.

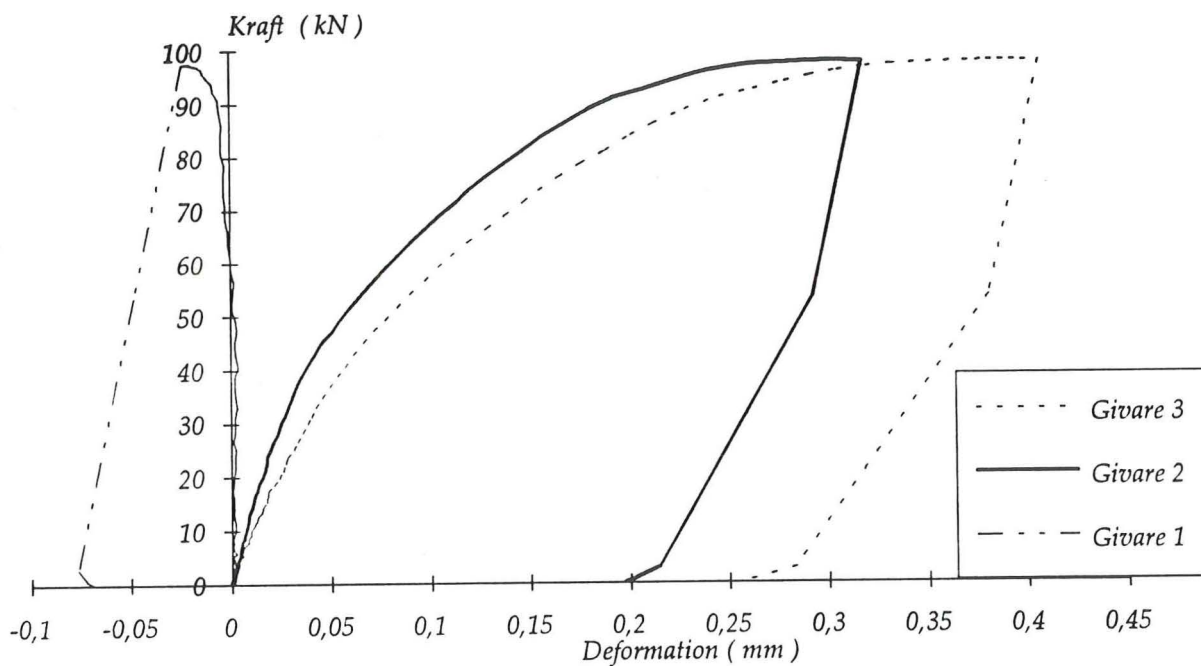


Fig.1.

C2. φ_{t_0} :s Hållfasthetsberoende

Figuren nedan visar koefficienten φ_{t_0} som funktion av kvoten mellan aktuell hållfasthet och 28 dagars hållfasthet.

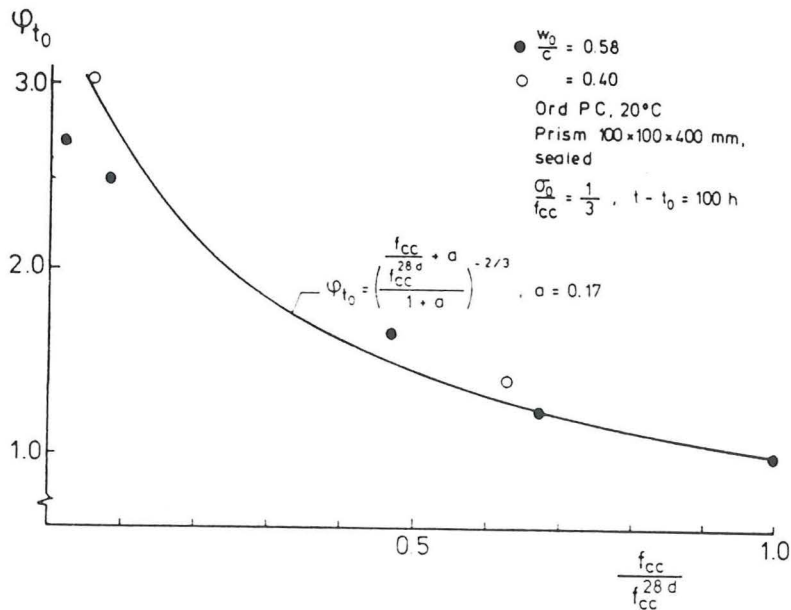


Fig.2. Krypkoefficientens åldersberoende som funktion av $f_{cc} / f_{cc} 28 \text{ d.} /1/$.

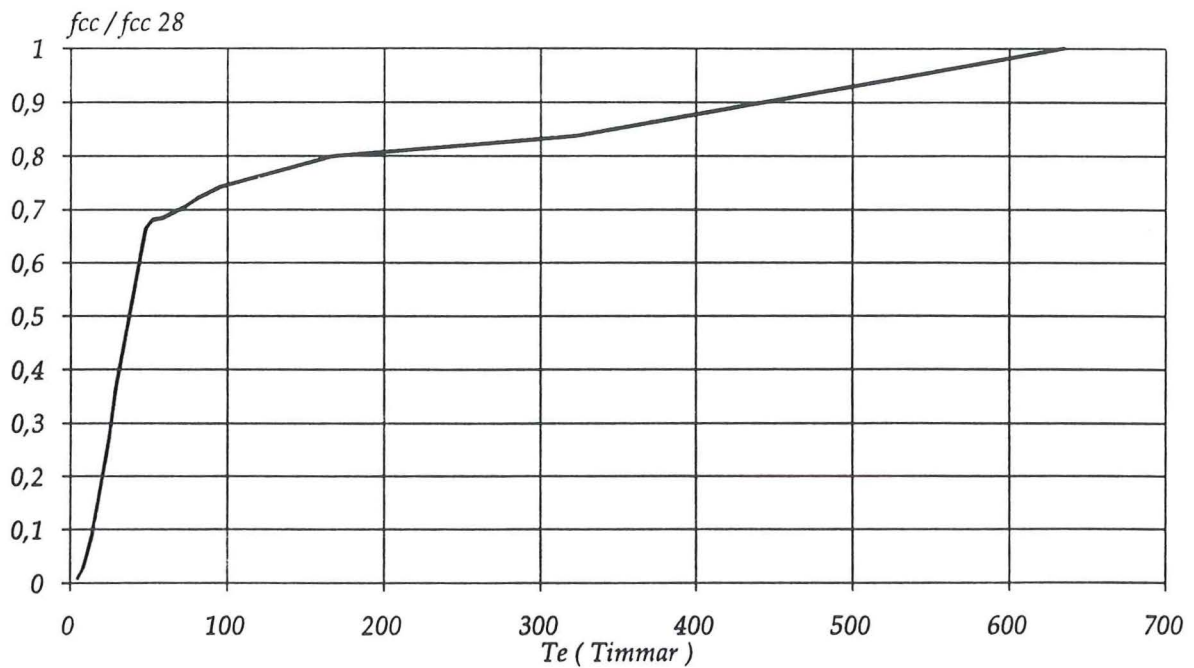


Fig.3. $f_{cc} / f_{cc} 28 \text{ d. STD}$

BILAGA.D

D1. Koefficienten a för cementpasta tillverkad av standardcement beräknas genom att använda värden från ett tidigare bestämt fall. För cementpasta, med $v_{ct}=0,35$, tillverkad av standard portlandcement har man i laboratorium bestämt 28-dygns dynamiska E-modulen till 24 GPa.

$$\frac{W_n}{c}(28, 20) = h_{(28, 20)} \times \left(\frac{W_0}{c}\right)^{\frac{2}{3}}$$

$h(28, 20) = 0,270$. Värdet är hämtad från /11/.

$$\Rightarrow \frac{W_n}{c}(28, 20) = 0,270 \times (0,35)^{\frac{2}{3}} = 0,134$$

$$\Rightarrow \kappa(28, 20) = \frac{2,84 \times \frac{W_n}{c}(28, 20)}{0,35 + 1,28 \times \frac{W_n}{c}(28, 20)} = \frac{2,84 \times 0,134}{0,35 + 1,28 \times 0,134} = 0,73$$

$$E(28, 20) = a \times \kappa^b(28, 20) \Rightarrow 24 = a \times (0,73)^{2,5} \Rightarrow a = 52,7$$

Således formel (4.4) förenklas till:

$$E_p(t, \theta) = 52,7 \times \kappa^{2,5}(t, \theta)$$

D2. Tabellen nedan är hämtad från /11/. I tabellen redovisas $\frac{W_n}{C}$:s värde för fyra olika cementtyper med två olika vct. Fall A gäller för betong tillverkad av standardcement. För betong med vct som avviker från vct i tabellen kan mängden kemiskt bundet vatten bestämmas genom att linjär interpolera mellan tabellvärdena.

Tabell.1. The non-evaporable water content after isothermal curing at +20°C

Cement type	W_0/C	Non-evaporable water W_n/C (kg/kg)							
		Hydration time at +20°C							
		8 h	23 h	32 h	47 h	56 h	71 h	28 d	91 d
A	0.45	0.012	0.065	0.083	0.098	0.109	0.109	0.161	0.165
	0.65	0.014	0.074	0.094	0.112	0.124	0.144	0.201	0.221
B	0.45	0.013	0.061	0.075	0.087	0.096	0.103	0.151	0.157
	0.65	0.015	0.068	0.093	0.107	0.117	0.132	0.195	0.219
C	0.45	0.009	0.043	0.060	0.067	0.074	0.090	0.131	0.146
	0.65	0.009	0.047	0.062	0.077	0.085	0.096	0.170	0.197
D	0.45	0.006	0.036	0.043	0.050	0.058	0.065	0.113	0.130
	0.65	0.007	0.038	0.053	0.055	0.063	0.085	0.145	0.161

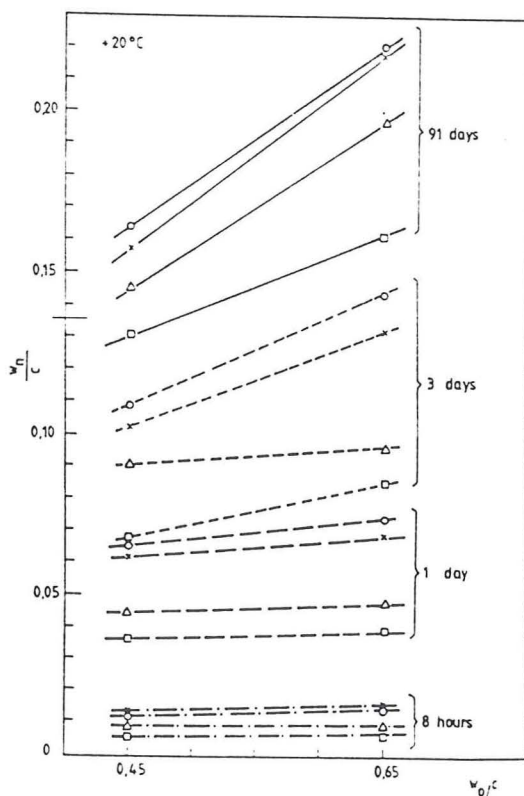


Fig.1. Kemiskt bundet vatten som funktion av vct för olika mognadstider.

BILAGA.E. Diagram och tabeller från provningarna

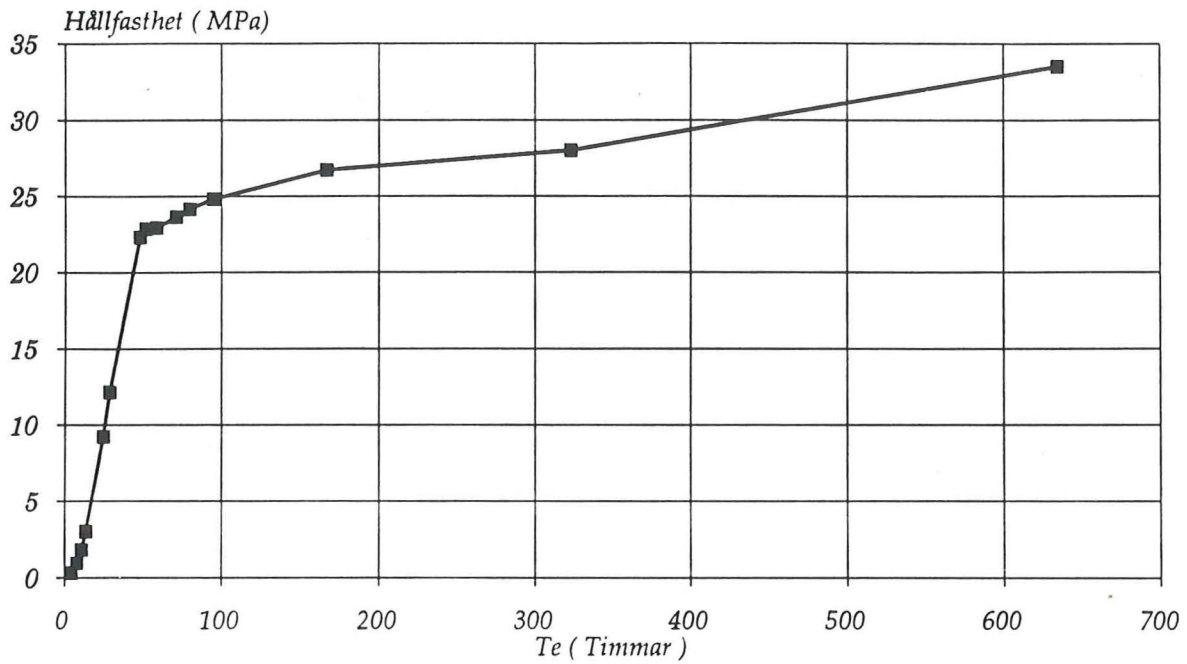


Fig.1. Hållfasthet som funktion av tiden. STD.

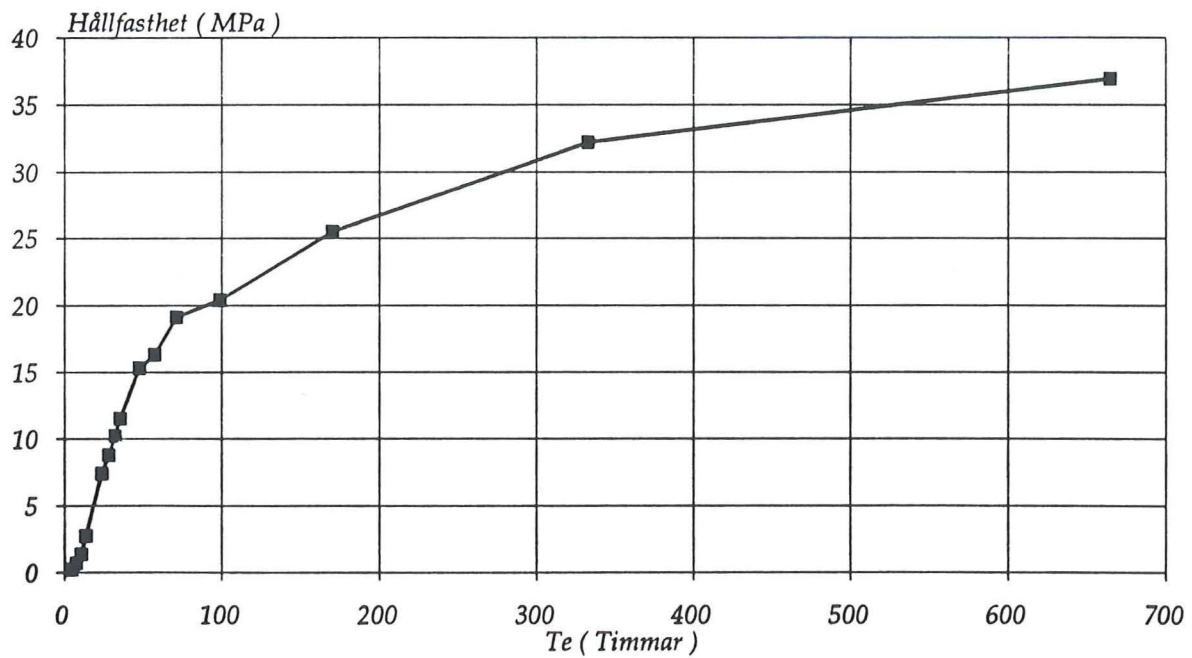


Fig.2. Hållfasthet som funktion av tiden. ANL.

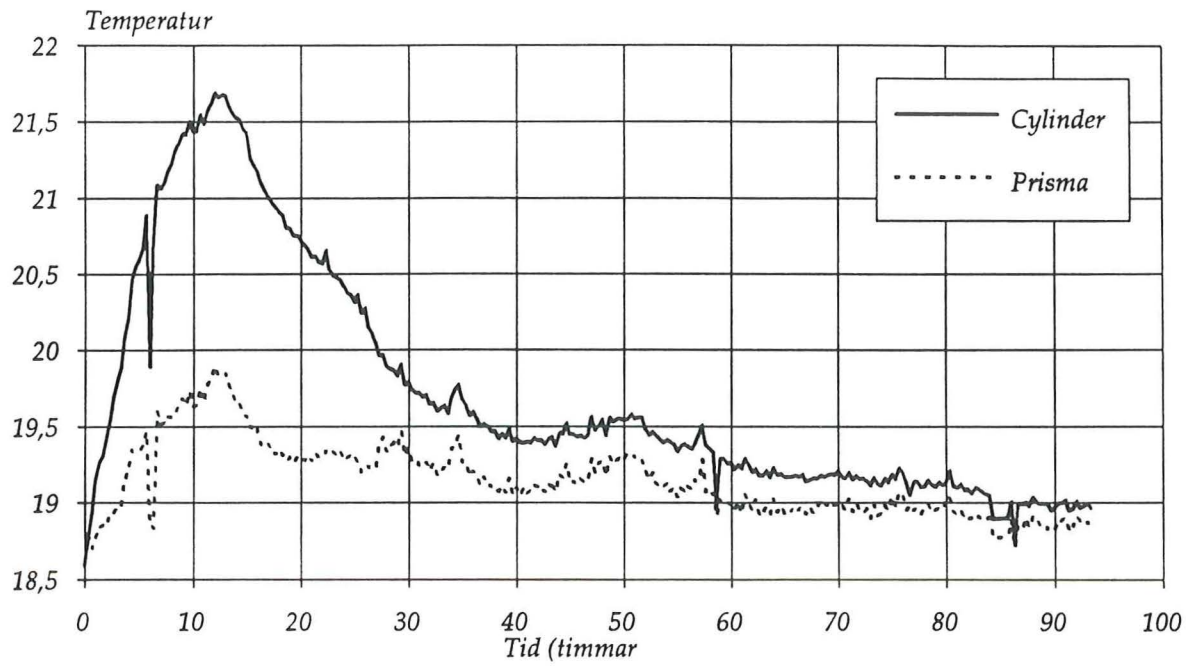


Fig.3. Härdningstemperaturen. STD.

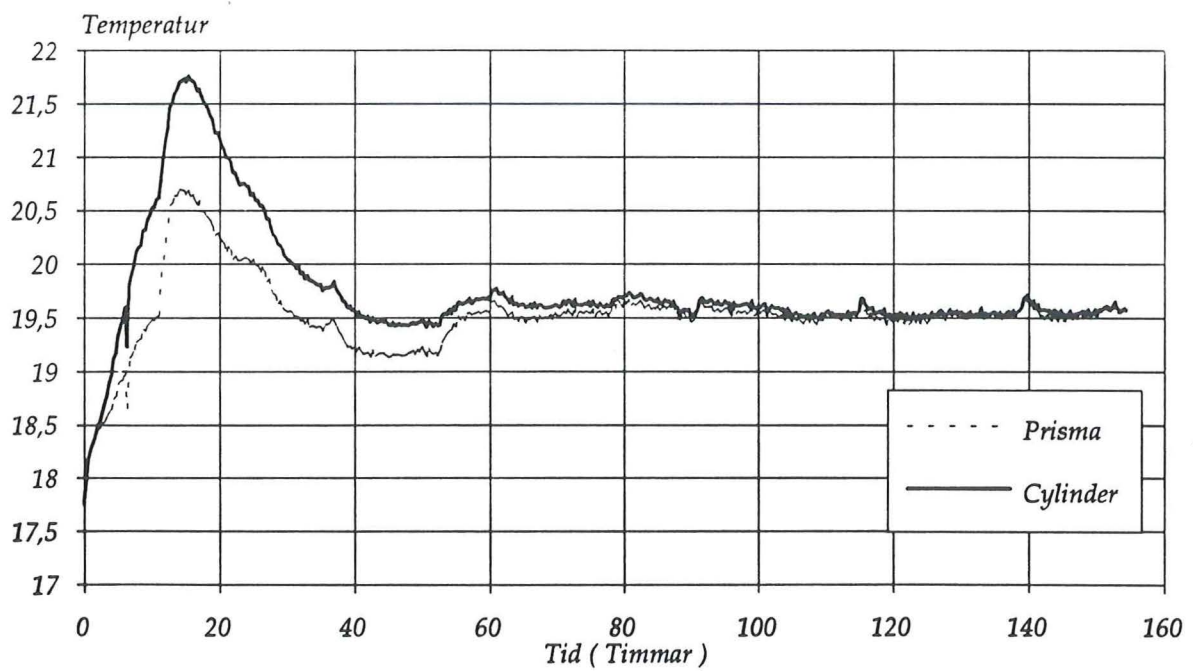


Fig.4. Härdningstemperaturen. ANL.

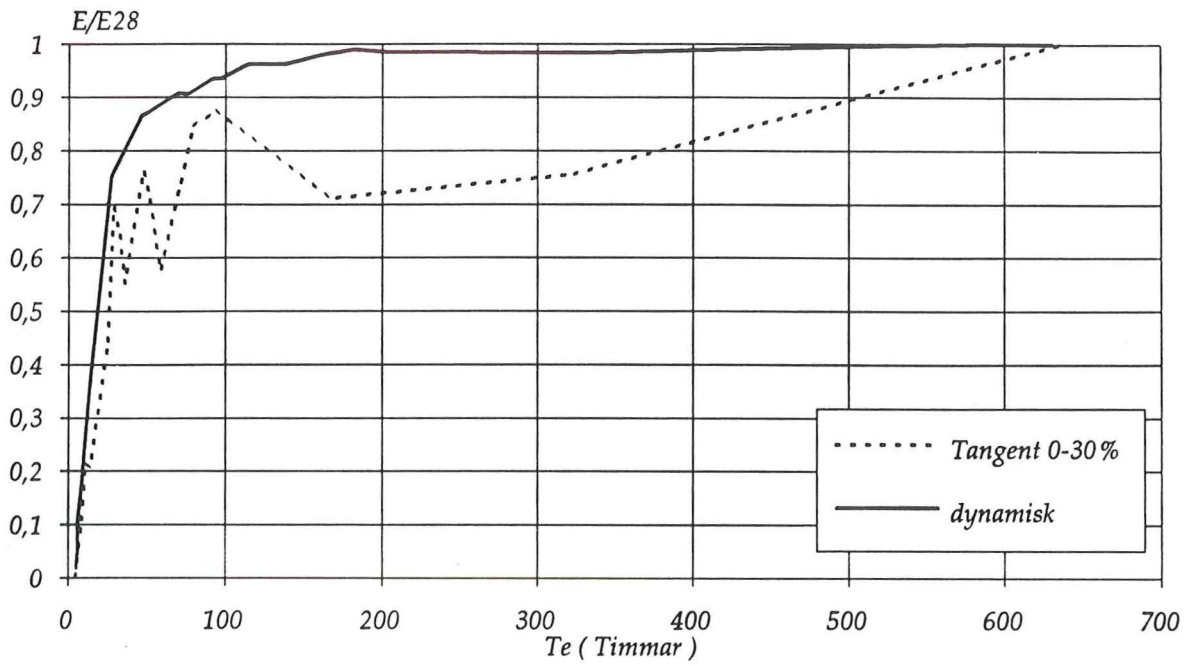


Fig.5. Relativ E-modulstillväxt. STD.

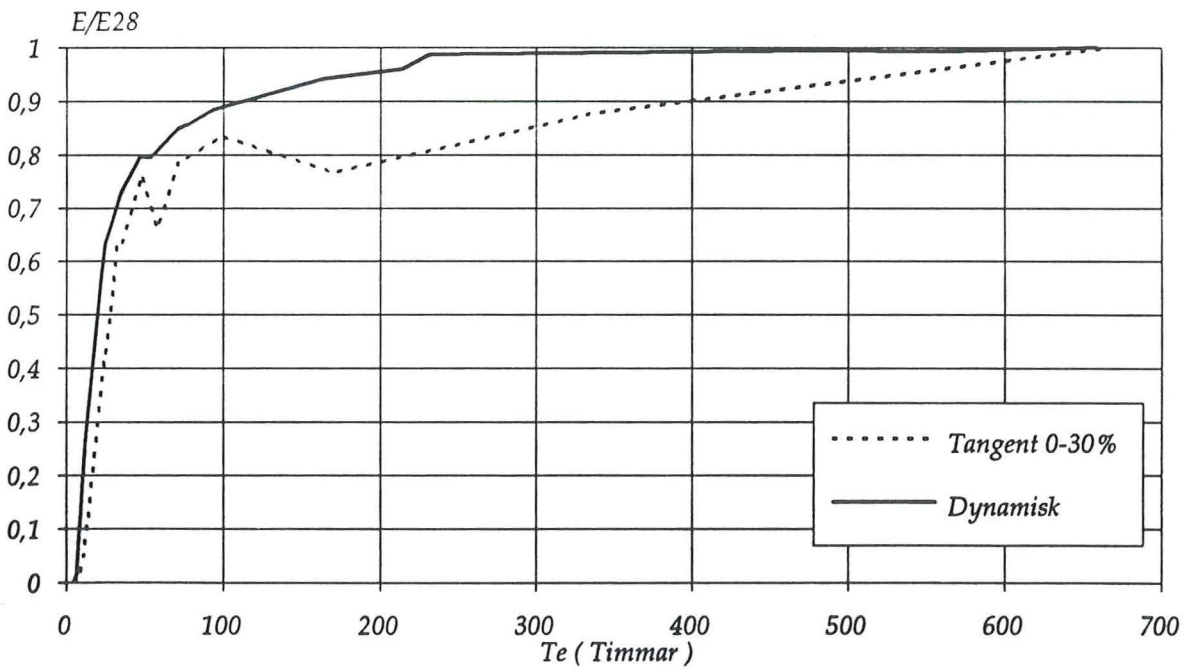


Fig.6. Relativ E-modulstillväxt. ANL

Figur 7 och 8 visar förhållandet mellan uppmätt tangent-och sekant E-modul som funktion av hållfastheten. Som framgår av figurerna är E_{tg} ca 30-60% större än E_{sek} vid ett mycket tidigt skede efter gjutningen. Med växande hållfasthet minskar skillnaden till ca 10%.

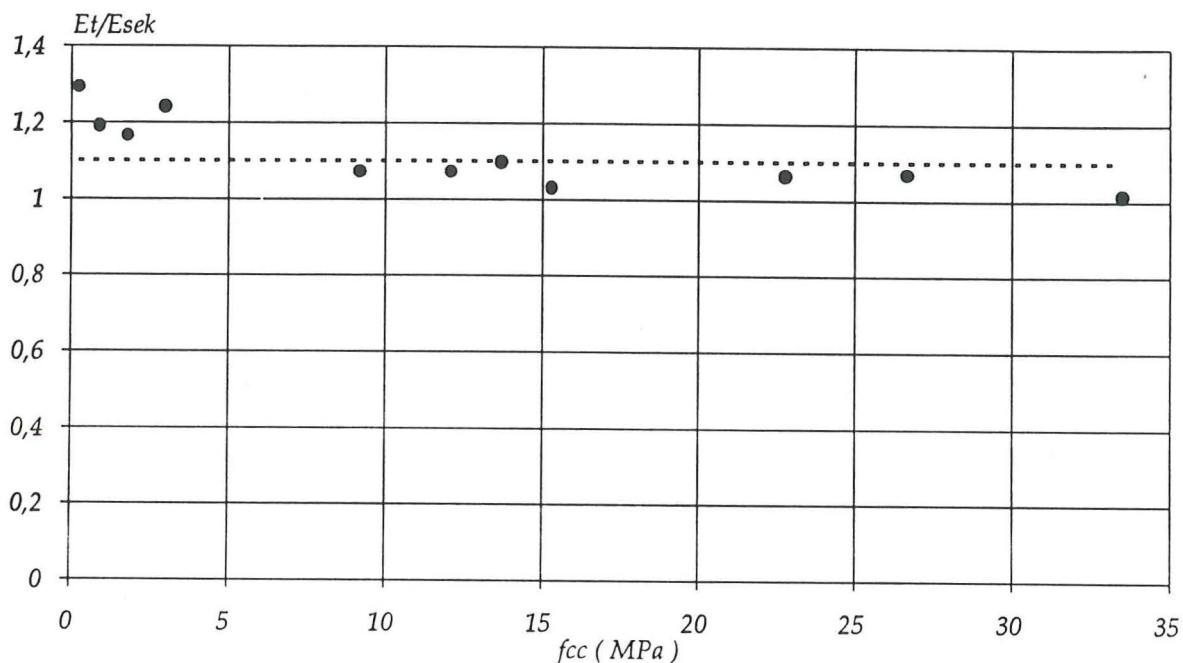


Fig.7. Förhållandet mellan E_{tg} och E_{sek} uppmätt vid denna undersökning. Spänningsnivå 0-30% av brottlasten. STD

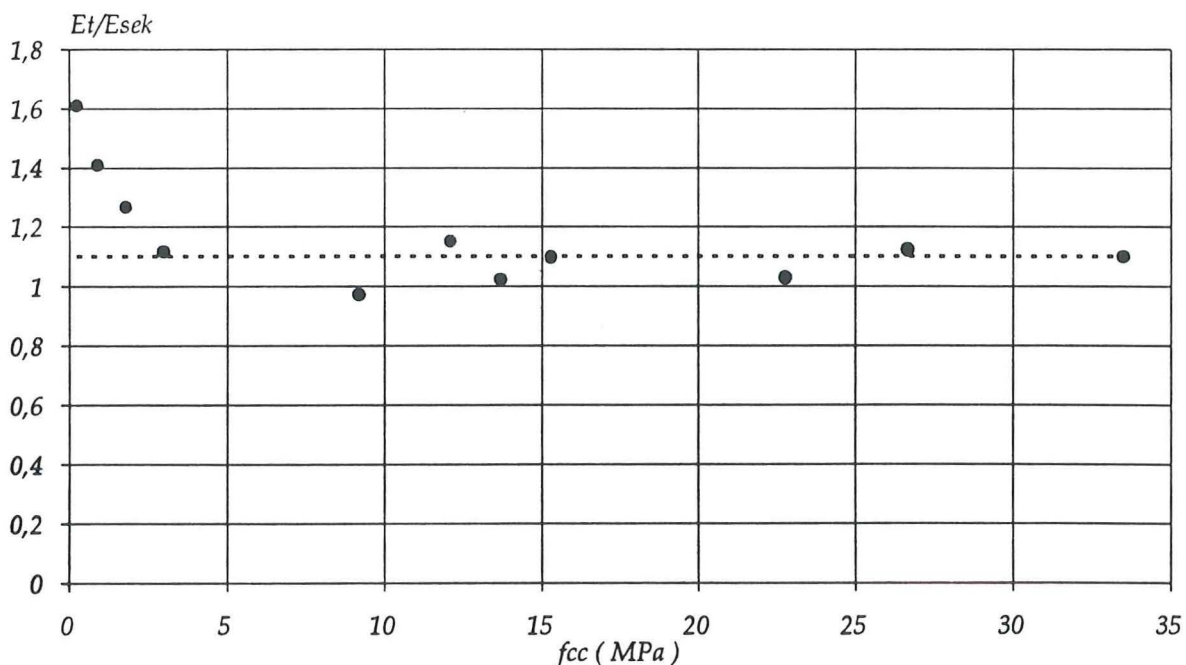


Fig.8. Förhållandet mellan E_{tg} och E_{sek} uppmätt vid denna undersökning. Spänningsnivå 5-25% av brottlasten. STD

Tabell 1. Uppmätt resonansfrekvens för tre provkroppar i Hz och beräknad dynamisk E-modul i GPa som funktion av ekvivalent mognadsålder. Mätdata.

Ålder	STD				Ålder	ALN			
	1	2	3	Ed		1	2	3	Ed
5,1 h	580	880	620	0,65	5,7	280	340	360	0,14
5,9	1040	1280	1100	1,75	6,7	680	780	640	0,7
6,6	1640	1880	1800	4,2	8,2	1540	1480	1480	3
9	2240	2240	2280	6,8	9,2	1960	1880	1880	4,9
11,5	2800	2720	2840	10,3	10,2	2280	2120	2200	6,5
14	3280	3240	3240	14	12,7	2920	2720	2760	10,5
24,3	4440	4400	4400	25,4	22,6	4280	4800	4400	22,5
27,8	4720	4640	4640	28,4	27,5	4560	4320	4400	25,6
45,5	4960	4960	5040	32,4	34,8	4720	4560	4720	28,4
46,9	4960	5040	5040	32,7	47,1	5040	4720	4880	31,1
50,3	5040	5040	5040	32,9	53,7	5040	4720	4880	31
69,6	5120	5120	5120	34,3	70,5	5200	4880	5040	33,1
76,1	5120	5120	5200	34,3	77,2	5200	4960	5120	33,4
91,6	5200	5200	5200	35,4	92,9	5280	5040	5120	34,5
97,3	5200	5200	5200	35,4	163,7	5440	5200	5360	36,8
114,7	5280	5280	5360	36,4	214,2	5520	5280	5360	37,5
138,4	5280	5280	5360	36,4	231,7	5600	5360	5440	38,5
161,8	5360	5360	5360	37,1	471,8	5600	5360	5520	38,8
182,2	5360	5360	5440	37,4	565,4	5600	5360	5520	38,7
204,6	5360	5360	5440	37,3	658,6	5600	5360	5520	39
230,4	5360	5360	5440	37,3					
293,6	5360	5360	5440	37,2					
341,8	5360	5360	5440	37,2					
454,1	5360	5440	5440	37,5					
585,7	5360	5440	5520	37,9					
630,7	5360	5440	5520	37,9					

Tabell 2. Uppmätt statisk E-modul i GPa som funktion av ekvivalent mognadsålder.

Mätdata.

STD					ANL				
Ålder	1	2	3	4	Ålder	1	2	3	4
4,7	0,031	0,024	0,037	0,023	5,3	0,017	0,015	0,018	0,015
8,3	2,8	2,4	3,1	2,2	8	0,18	0,14	0,2	0,13
11,1	6,6	5,7	7,4	5,8	11,1	1,5	1,2	2	1,2
14,1	6,5	5,2	7,7	6,9	13,9	3,7	2,7	5,1	3,3
24,9	13,4	12,5	14	14,4	24,2	12,5	11,9	12,9	12,9
29	21,6	20,1	22,7	19,7	28,5	15,3	13,9	15,8	14,2
32,9	20,1	18,3	20,9	20,5	32,5	19,2	17,1	20,6	16,2
35,9	17,2	16,7	18,1	16,5	35,8	19,3	16,9	20,8	18,2
48,2	23,7	20,2	25,5	23,1	48,3	23,1	18,8	27	20,6
52	22,1	20,8	22,3	21,7	58	20,1	18,4	20,8	18,5
58,9	17,9	15,6	19,4	17,4	71,5	23,8	20,7	25,3	20,6
71,6	23	20,4	24,6	21,7	99,3	25,4	23,9	25,8	24,2
79,9	26,3	22,8	28,8	23,7	170,2	23,3	27,7	23,7	25,6
94,9	27,2	23,7	29,7	23,9	333,4	26,6	25,5	27,5	25,5
167	22,1	20,7	23,2	20,7	665	30,4	28	32,5	26,8
323,7	23,5	21,3	24,9	21,3					
635,4	31,1	30,7	31,2	28,4					

1=Tangent-E-modul 0-30% av brottlasten

2=Sekant " 0-30% "

3=Tangent " 5-25% "

4=Sekant " 5-25% "

Tabell 3. Beräkning av den dynamiska E-modulen enligt teoretisk modell
beskriven i kapitel 4. STD.

<i>Tid</i>	$\frac{W_n}{c}$	κ	E_p	$\frac{E_b}{E_p}$	n	E_{betong}
8 tim.	0,014	0,06	0,05	1008	-0,42	1,4
23 "	0,072	0,29	2,40	20,0	-0,28	21,5
32 "	0,092	0,36	4,10	12,3	-0,25	26,2
47 "	0,110	0,41	5,80	8,6	-0,24	29,5
56 "	0,120	0,45	7,10	7,0	-0,23	31,4
71 "	0,140	0,50	9,10	5,5	-0,22	33,7
28 d	0,190	0,64	17,20	2,9	-0,15	39,8