



Afdelingen for Bærende Konstruktioner  
Department of Structural Engineering  
Danmarks Tekniske Højskole · Technical University of Denmark

ABK's Informationsdag 1985

Serie R

No 198

1985

LOK-STYRKEPRØVNING AF BETON  
Brudmekanisk Analyse

Herbert Krenchel og Peter Mossing

Ved non-destruktiv prøvning af beton er det som oftest materialets trykstyrke, man er interesseret i at bestemme - helst naturligvis så nøjagtigt som muligt.

Der findes en del forskellige prøvemethoder til dette formål. Flere af dem måler imidlertid en materialeegenskab (eller en kombination af egenskaber) ved betonen, som kun har en ret svag korrelation til materialets trykstyrke. Selv ved et meget stort antal målinger med en sådan metode fås derfor i de fleste tilfælde kun et meget usikkert skøn over trykstyrken, idet man ikke har tilstrækkeligt styr på diverse parasitparametre.

En af de bedste metoder til formålet synes at være den af Kierkegaard-Hansen for ca. 25 år siden på DIAB udviklede, såkaldte LOK-styrkeprøvning, hvor en indstøbt, cirkulær stålskive (Ø 25 mm x 8,5 mm) trækkes ud af betonen ved belastning vinkelret på betonoverfladen. Skiven er indstøbt 25 mm under betonoverfladen, og den donkraft, som præsterer den udadrettede kraft, træder på betonoverfladen med et cirkulært modhold (Ø 55/Ø 70 mm), som placeres koncentrisk over stålskiven, /1/.

Denne prøvemethode har vakt megen interesse internationalt. Systemet er i årenes løb blevet afprøvet og kalibreret ved omfattende forsøg på et betydeligt antal forskningslaboratorier og i forbindelse med flere, meget store byggeprojekter /2/.

På ABK har vi foretaget omfattende kalibreringsforsøg med denne styrkeprøvemethode i 1969-70 (STRVF-støttet projekt) samt ti år senere (TR-støttet projekt i samarbejde med Teknologisk Institut, Byggeteknik) i en tilsvarende undersøgelse af den såkaldte CAPO-test metode, hvor udtrækskiven indbores i betonen umiddelbart før prøvningen.

I årenes løb har der været megen diskussion om denne prøvemethode - ind imellem, synes det, temmelig følelsesladet. Mange har haft svært ved at acceptere, at der virkelig skulle være en så snæver korrelation imellem LOK-styrken og betonens trykstyrke, som tilfældet synes at være ud fra næsten alle de omfattende kalibreringer, der i tidens løb er gennemført /3/.

Flere har analyseret problemet teoretisk, Jensen og Bræstrup således i 1976 ved plasticitetsteoretisk beregning /4/ og Sabye Ottosen i 1981 med et meget avanceret elementprogram /5/.

Begge disse undersøgelser bekræfter, at det er betonens trykstyrke, der er bestemmende for brudkraften ved LOK-forsøget (sidstnævnte undersøgelse forklarer løvrigt også, hvorfor den lineære kalibreringskurve ikke peger direkte tilbage imod origo i diagrammet). Trods disse undersøgelser er der stadig mange, der har svært ved at acceptere, at man ved et såkaldt udtærkningsforsøg som dette, kan måle et materiales trykstyrke.

#### Brudmekanisk analyse

I 1984 besluttede vi i forbindelse med et gæsteprofessorbesøg på Afdelingen x) at foretage en direkte analyse af brudforløbet ved LOK-forsøget. På et større antal betonprøvelegemer med indstrøbet LOK-skiver, alle støbt af samme beton, ville vi foretage LOK-prøvningsbelastning til forskellige niveauer i forhold til maksimallasten og derpå aflaste. Derefter skulle betonprøvelegemerne skæres op og analyseres for mikrorevneudvikling i betonen i den hårdest anstrengte zone mellem LOK-skiven og donkraftens modhold på betonoverfladen.

Der blev til forsøgene støbt 10 stk. 20 cm betonterninger, hver forsynet med to stk. LOK-skiver (placeret i to modstående sideflader i terningformen).

x) Professor Surendra P. Shah, Department of Civil Engineering, Northwestern University, Evanston, Illinois, USA.

Til prøvningen var LOK-donkraften ombygget, forsynet med en elektrisk olietrykstransducer for registrering af trækraften, hvorved skiven bliver belastet, samt to stk. induktive flytnings-transducere til måling af den relative vandring mellem donkraftens sæde og trækboltens frie ende udenfor betonen, se fig. 1. Dette måleudstyr var koblet til en (2-pens) x/y-skriver, således at der kunne optegnes en komplet arbejdskurve for LOK-forsøget (inklusive den nedadgående gren, efter at maksimumslasten var passeret).

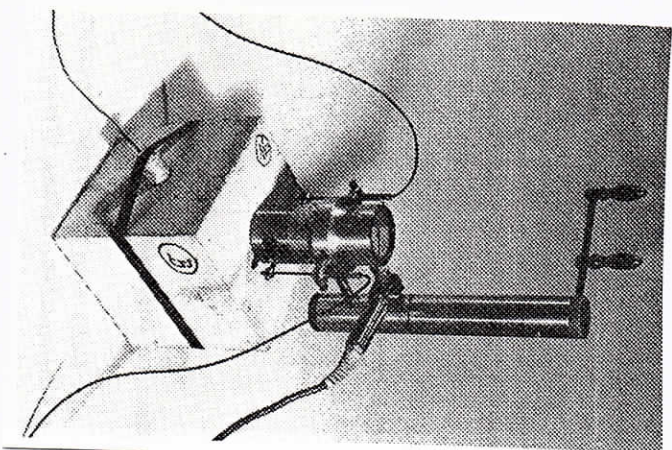


Fig. 1. Ombygget LOK-donkraft.

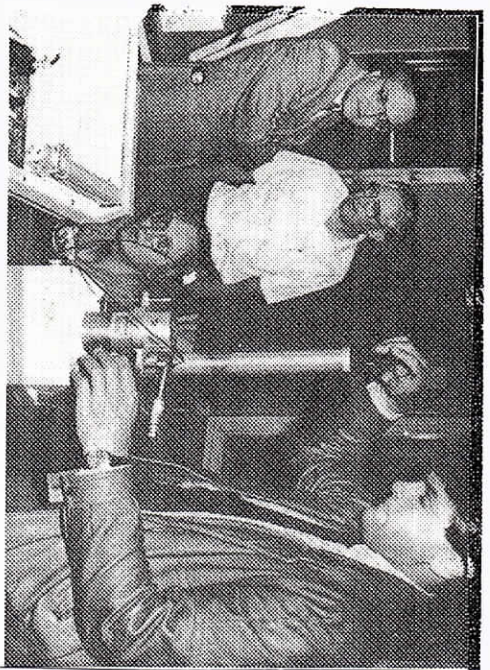


Fig. 2. Forsøgsopstilling med 2-pens x/y-skriver.

Foruden dette var der påspændt en akustisk emissions-transducer på terringen (se figuren). Denne transducer var koblet til den anden pen på x/y-skriverværket, således at ae-aktiviteten, som er et mål for dannelsen af mikrorevner i betonen, registreres samtidig med arbejdskurveoptegningen hele vejen gennem forsøget, se fig. 2.

#### Forsøgsprogram

De 20 belastningsforsøg blev udført på følgende måde:

Seks stk. blev gennemført helt ud, forbi arbejdskurvens topunkt med fortsat indpumpning af olie i donkraftefladen, indtil trækbelastningen var faldet til ca. 20% af maksimalværdien, se fig. 3.

De resterende 14 forsøg blev gennemført med kun delvis belastning til et forud valgt niveau og derpå aflastning ved fjernelse af olietrykket. Seks stk. blev således aflastet fra forskellige niveauer på arbejdskurvens opadgående gren, se fig. 4, seks stk.

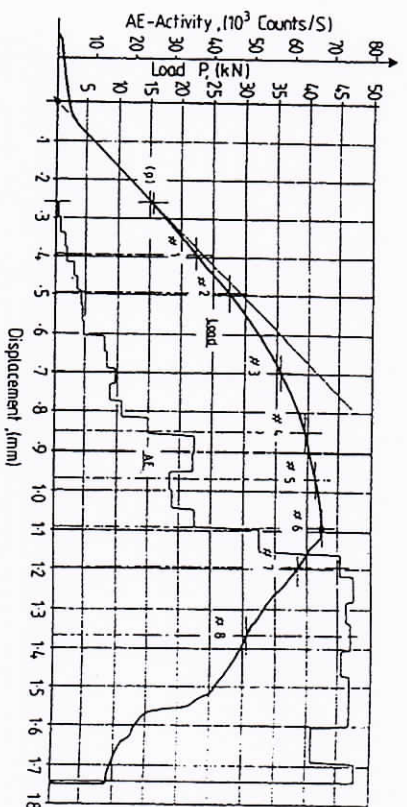


Fig. 3. Komplet arbejdskurve med tilhørende ae-diagram.

tilsvarende fra den nedadgående gren, se fig. 5, medens to stk. blev aflastet netop fra arbejdskurvens topunkt.

Efter hvert forsøg, når LOK-donkraftefladen var fjernet, blev betonoverfladen, hvor donkraftefladen havde stået, undersøgt for eventuelle revner eller deformationer. En stållineal blev lagt diameteralt hen over fladen, og det blev således undersøgt, om betonoverfla-

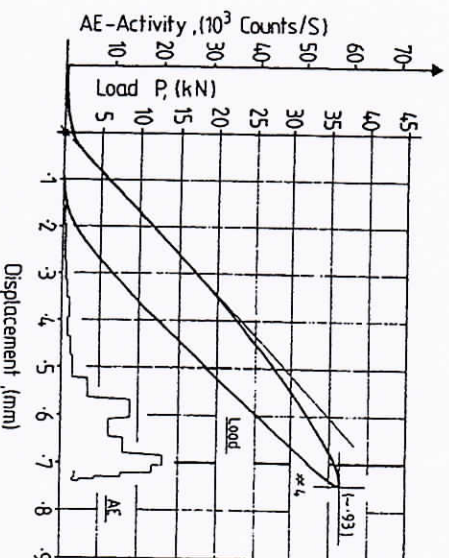


Fig. 4. Arbejdskurve, forsøg nr. 4, med aflastning fra ca. 93% af  $P_{max}$ .

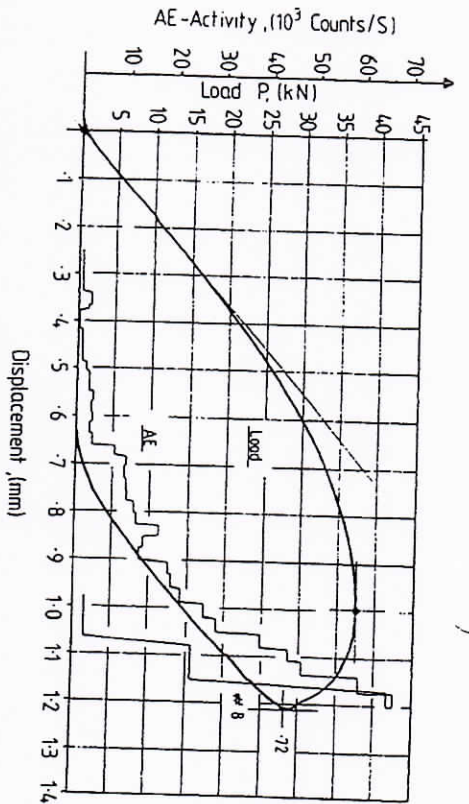


Fig. 5. Arbejdskurve, forsøg nr. 8, med aflastning fra 72% af  $P_{max}$  på kurvens nedadgående gren.

den indenfor donkraftens trædeflade var trukket ud i forhold til det oprindelige niveau.

Efter afslutning af belastningsforsøgene blev ialt otte prøver udvalgt til opskæring og mikrorevneanalyse. Belastningsniveauet for disse prøver var følgende, nr. 1-5: ca. 53%, ca. 65%, ca. 84%, ca. 93% og ca. 97% af maksimallasten, nr. 6: 100% (toppunktslasten netop nået), nr. 7 og 8: henholdsvis 91% og 72% af top-punktslasten, men fra arbejdskurvens nedadgående gren. (De otte niveauer er angivet på fig. 3).

#### Opskæring af betonen

Der blev forst lagt et snit igennem terningen parallelt med prøverjaden umiddelbart under LOK-skiven (ca. 34 mm under beton-overfladen). En LOK-bolt blev skruet i skiven, og denne blev banket forsigtigt bagud af klodsen. Derefter blev klodsen skåret igennem med et herpå vinkelret snit, således at klængens ene snitflade gik gennem LOK-forsøgets axe.

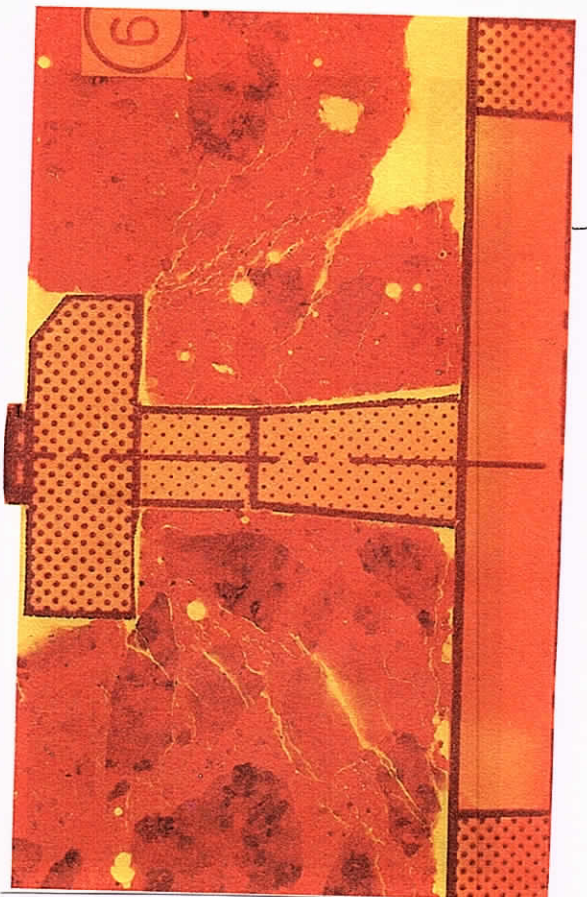


Fig. 6. Revneanalyse, forsøg nr. 6 (Aflastet fra arbejdskurvens toppunkt).

Denne flade blev herefter sløbet og imprægneret med en lavviskos epoxy/hærdere-blanding med iblandet fluorescerende farvestof. Efter hærdning blev betonfladen poleret, klar til mikroskopering og mikrofoto-grafering. Denne sidste del af undersøgelsen blev udført på DRAB (Fysik og Materialer) hvor man har udviklet en sådan, meget avanceret teknik for mikrorevneanalyse i beton /6/.

På fig. 6 ses et enkelt eksempel på et sådant snitfladebillede. Det giver dog kun en svag afgans af, hvad man kan se på de originale farvefotos, hvor der med forskellige filtre er opnået maximal kontrast med cementpastaen i lyserød og tilslagspartiklerne mørkerøde, medens alle luftporer og revner (ned til revnevidde ca. 1  $\mu\text{m}$ ) står klart gult.

#### Analyse

Ud fra en analyse af mikrorevnerne sammenholdt med den akustiske emissionsmåling kan der fastslås følgende vedrørende det indre brud i betonen under LOK-forsøget:

1. Mikrorevnedannelsen starter på et tidligt belastningsniveau (fra ca. 30% af maksimallasten), tilsyneladende sammenfaldende med arbejdskurvens proportionalitetsgrænse.
2. De første mikrorevner opstår normalt i mørtelen, eller i fasen mellem mørtel og tilslagspartikler. Ved højere belastningsniveau går nogle af revnerne også gennem stenpartiklerne.
3. Ved de lavere belastningsniveauer er mikrorevnerne noget mere koncentreret i nærheden af LOK-skivens opadvendte flade end opad imod donkraftens sæde. Senere synes denne koncentrationsforskel at jævne sig ud.

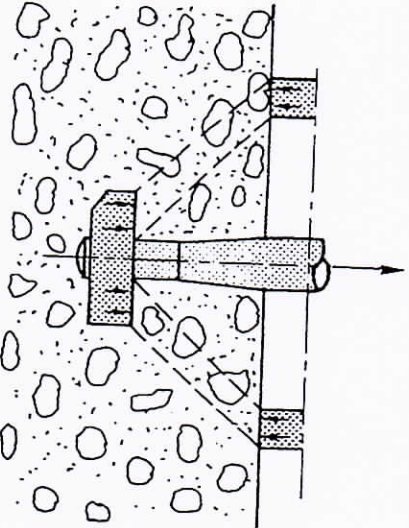


Fig. 7. Område i betonen, hvor trykspændingerne primært er koncentreret.

4. De fleste mikrorevner dannes i keglestub-området fra skivens overside ( $\varnothing$  8/ $\varnothing$  25 mm) og til donkraftens trædeflade ( $\varnothing$  55/ $\varnothing$  70 mm), se fig. 7. Deres hovedretning er stort set parallel med denne keglestubs yderflade (topvinkel: 80-85°).
5. I visse tilfælde starter der en revne fra LOK-skivens yderste, opadvendende kant med retning imod den inderste kant på donkraftsædets modhold (topvinkel: 60-65°). Dette er tilsyneladende et sekundært revnefænomen som normalt ikke viser sig, før

end arbejdskurvens toppunkt er passeret. I ingen af de undersøgte tilfælde var en sådan sekundær revne fuldt udviklet hele vejen rundt og hele vejen op fra skiven til modholdet, før end arbejdskurvens toppunkt var passeret.

6. Praktisk taget alle revner i det primære revnemønster er overordentlig fine (selv i nærheden af brud er revnevidderne sjældent over 0,01 mm). Den sekundære revne derimod er grovere, revnevidde ca. 0,2 mm.

7. Idet arbejdskurven når sit toppunkt, er det primære revnemønster stadigvæk det dominerende. Just efter slår den sekundære revne igennem hele vejen, således at en udtørkningskegle kan dannes. Samtidig med dette forekommer der et drastisk spring i den akustiske emission. En forøgelse med omkring 100% i aktivitet ses således på alle arbejdskurver, just efter at toppunktet er passeret. Denne æ-aktivitet holder sig stort set konstant under hele sidste del af forsøget.

8. Der er ingen revnedannelse i den frie betonoverflade, hvor donkraften har stået og ingen udtørkning at se efter forsøget, såfremt aflastningen foretages før eller umiddelbart efter, at maksimumkraften er konstateret.

Fortsættes forsøget derimod ud ad arbejdskurvens nedadgående gren, hvor det sekundære revnemønster er fuldt udviklet, ses efter aflastning en cirkulær revne på den frie betonoverflade langs donkraftsædets inderside ( $\varnothing$  55 mm), og nu kan der måles en egentlig udtørkning (i begyndelsen dog kun få tiendedele mm).

#### Konklusion

Der bør gennemføres en egentlig billedscanning-analyse med kvantificering af hele mikrorevneudviklingen ud fra de foreliggende billeder 7/7, 7/8/.

På basis af de foreløbige observationer som her beskrevet synes det imidlertid nærliggende at konkludere, at det primært er de koncentrerede trykspændinger i betonen i området mellem LOK-skivens overside og donkraftrædets underside, som bestemmer den målte maksimalkraft ved denne prøvemethode, hvilket da er årsagen til den meget snævre korrelation mellem LOK-styrken og betonens trykstyrke.

Den megen forvirring og uklarhed, som ofte er forekommet omkring dette spørgsmål, skyldes nok bl.a. den misvisende benævnelse, som man har givet denne prøvemethode: et udtærksforsøg. Der finder ikke nogen form for udtærkning sted ved en normal prøvning af denne type, hvis blot man aflaster, når maksimalkraften er konstateret. Egentlig udtærkning kan først forekomme, når den sekundære revne er fuldt udviklet, men dette følger just efter, at topunktet er passeret.

#### Referencer

1. Kierkegaard-Hansen, P., "LOK-Strength", Nordisk Betong Stockholm, 1975, Nr. 3, pp. 19-28.
2. Krenchel, H. and Bickley, J.A., "Concrete Pullout Test Methods, Historical Background and Scientific Level Today". Presented at the American Concrete Institute Annual Convention, Phoenix, Ariz, USA, March 1984.
3. Krenchel, H. and Petersen, C.G., "In-Situ Testing with LOK-Test, Ten Years Experience". Presented at the International Conference on In Situ/Non Destructive Testing of Concrete, CANMET, Ottawa, Ontario, Canada, Oct. 1984.
4. Jensen, B.C. and Bræstrup, M.W., "Lok-Test Determine the Compressive Strength of Concrete", Nordisk Betong, Stockholm 1976, Nr. 2, pp. 9-11.
5. Ottosen, N.S., "Nonlinear Finite Element Analysis of Pull-Out Test", Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 107, No. ST4, April, 1981, pp. 591-603.
6. Mønsted, K., and Thorsen, T., "Interference Fluorescence Analyses of Cracks", DIA-LOG, 20th anniversary 77, Danmarks Ingeniørakademi, Bygningsafdelingen, Lyngby, Denmark, 1977, pp. 213-222.
7. Underwood, E.E., de Wit, R., and Moore, G.A. (editors), International Congress for Stereology, 4. Congr., Gaithersburg, Md., USA, 1975. National Bureau of Standards, Special Publication 431.
8. Dehoff, R.T., "Quantitative Metallography". Techniques of Metal Research by R.F.Bunshah (editor). Volume II, Techniques of the Direct Observation of Structure and Imperfections, Part 1, Chapter 9. Interscience Publishers, 1968, pp. 221-253.