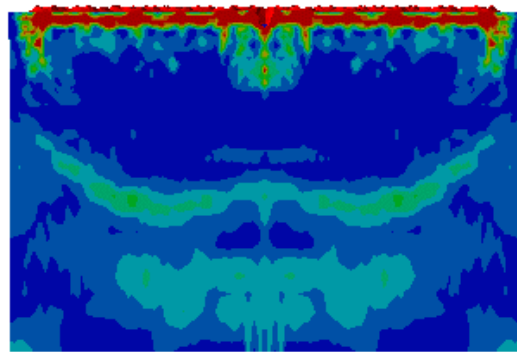


# CHALMERS



## Splitterbelastad betong

## Experiment och numeriska analyser

JOOSEF LEPPÄNEN

*Institutionen för konstruktion och mekanik*  
*Betongbyggnad*  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg, Sverige 2003

Rapport nr. 03:6



RAPPORT NR. 03:6

# Splitterbelastad betong

## Experiment och numeriska analyser

JOOSEF LEPPÄNEN

Institutionen för konstruktion och mekanik  
Betongbyggnad  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg, Sverige 2003

Splitterbelastad betong  
Experiment och numeriska analyser  
JOOSEF LEPPÄNEN

© JOOSEF LEPPÄNEN, 2003

ISSN 1650-5166  
Rapport No. 03:6  
Arkiv no. 31  
Institutionen för konstruktion och mekanik  
Betongbyggnad  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA AB  
SE-412 96 Göteborg  
Sverige  
Telefon: + 46 (0)31-772 1000

Framsida:  
Jämförelse mellan experiment och analys, se vidare kapitel 4.5.

Institutionen för konstruktion och mekanik  
Göteborg, Sverige 2003

Splitterbelastad betong  
Experiment och numeriska analyser  
JOOSEF LEPPÄNEN  
Institutionen för konstruktion och mekanik  
Betongbyggnad  
Chalmers tekniska högskola

## SAMMANFATTNING

Armerade betongkonstruktioner är det främsta skyddsmaterialet mot vapenverkan. Vid en explosion av en bomb utbreder sig en stötvåg och splitter kommer farande mot konstruktionen vilket utsätts för stora påfrestningar. Målsättningen i detta arbete är att öka kunskapen om hur betongens materialegenskaper förändras då den blir utsatt för splitter- och stötvågsbelastning. De egenskaper som främst studeras är hållfasthetsändring, sprickbildning och hur skadan i betong varierar med avståndet från ytan där splitter och stötvåg träffar. Vidare är en viktig målsättning att studera hur dessa belastningssituationer kan modelleras med numeriska metoder.

För att studera ovanstående belastningsfall har experiment och numeriska analyser genomförts. Både enstaka splitter och hela svärmar av splitter beskjutits mot tjocka betongblock. I dessa experiment har splitterbelastningen förenklats förhållande till det verkliga belastningsfallet från en bomb som briserar. Här har sfäriska stålkulor nyttjats som splitter. Anledningen till detta är att få tydliga randvillkor gällande splitterbelastningen, samt att kunna numeriskt modellera denna komplicerade belastningsfall. Efter belastningen har betongkropparna klivits för att studera avskalning och makrosprickbildning i betongen. Från urborrade kärnor från de belastade och obelastade betongblocken har tryck- och spräckprov genomförts för att studera hållfasthetsändring, samt har tunnfilmslipning utförts för att studera mikrosprickbildning.

Experimenten och numeriska analyser visar då splitter träffar en betongkropp skadas betongens ytskikt, där splittret krossar betongen. På ett avstånd på drygt två gånger det maximala splitterinträgningsdjupet påverkas inte betongens tryck- och draghållfasthet nämnvärt. Däremot påverkas hållfastheten vid ränderna av betongblocken från splitter- och stötvågsbelastningen. Numeriska analyser visar även att randvillkor har stor betydelse gällande stötvågsbelastning, samt är det viktigt att beakta både splitterinträgning och stötvågen som genereras från sprängladdningen för att korrekt simulera sprick- och skadeutvecklingen i betongen. AUTODYN har nyttjats för de numeriska analyser genomförda här.

Nyckelord: Betong, splitter, stötvåg, penetration, experiment, numeriska analyser



# INNEHÅLLSFÖRTECKNING

SAMMANFATTNING	I
FÖRORD	V
BETECKNINGAR	VI
1 INTRODUKTION	1
2 FÖRSÖKSUPPSTÄLLNING	3
2.1 Enstaka splitter	3
2.2 Splittersvärm	4
3 ANALYS AV EXPERIMENT	7
3.1 Provkropparna	7
3.2 Fotografier efter beskjutning av provkroppar	8
3.2.1 Enstaka splitter	9
3.2.2 Splittersvärm	10
3.3 Inträngningsdjup, kraterdjup och kraterdiameter	11
3.4 Strukturell förändring	12
3.4.1 Klyvning av provkropparna	13
3.4.2 Borrkärnor	14
3.4.3 Tunnfilmslipning	15
3.5 Tryckhållfasthet	18
3.6 Spräckhållfasthet	23
4 NUMERISKA ANALYSER	27
4.1 Tillståndsekvation för betong	27
4.2 Konstitutiv modell för betong	29
4.3 Splitterbelastning utan inverkan av stötvåg	33
4.4 Inverkan av enbart stötvågsbelastning	39
4.5 Kombinerad splitter- och stötvågsbelastning	48
5 DISKUSSION OCH SLUTSATSER	52
6 REFERENSER	53
APPENDIX	55
<b>CHALMERS</b> , <i>Konstruktion och mekanik</i> , rapport nr. 03:6	III





# FÖRORD

I denna studie har betongens egenskaper studerats för splitterbelastad betong. Studien har genomförts under tiden oktober 2002 till augusti 2003. Arbetet är en del av forskningsprojektet splitterbelastade betongkonstruktioners dynamiska verkningsätt. Projektet är ett samarbete mellan Räddningsverket och Chalmers Tekniska Högskola, där Räddningsverket finansierar projektet. En projektgrupp bestående av Professor Kent Gylltoft, Chalmers, Civilingenjör Björn Ekengren, Räddningsverket, Dr. Mario Plos, Chalmers, Dr. Morgan Johansson, Reinertsen AB och Lic. Joosef Leppänen, Chalmers, samlas kontinuerligt, där via livliga diskussioner nås ökad förståelse.

Samtliga försök med splitterbelastning har utförts på Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI) under ledning av Anders Carlberg. Försöksprogrammet är huvudsakligen delad i två uppsättningar; den första uppsättningen beskjuvs provkroppar av betong med enstaka splitter, medan den andra uppsättningen beskjuvs med en splittersvärm. Försöken med enstaka splitterskott har utförts av Jonas Irving och Bengt Carlsson på FOI. Försöken med splittersvärm har utförts av Anders Carlberg, Ulf Pettersson och Klas Bolling, samtliga från FOI. I försöken deltog även författaren av rapporten.

För att närmare studera betongens egenskaper har ett antal cylindrar borrats ur de beskjutna provkropparna. Efter skjutning fotograferades samtliga provkroppar. Urborring och fotografering av provkroppar har utförts av Lars Wahlström, Chalmers. Sågning och planslipning, samt utförda spräckprov har genomförts på Färdig Betong.

När betongen utsätts för extrem belastning bildas kraftig sprickbildning i betongen. Med tunnfilmsteknik går det att studera sprickbildning i betong med mikroskop. Tunnfilmslipning har utförts på MINOPREP.

Ett stort tack till alla inblandade i detta arbete. Jag vill även tacka nuvarande och forna kollegor på Betongbyggnad för intressanta och givande diskussioner på kafferaster och på våra interna Betongbyggnadsdagar.

Göteborg augusti 2003

Joosef Leppänen

# BETECKNINGAR

## Romerska versaler

$A$	Parameter för brott-flytyta
$A1, A2, A3$	Parametrar för tillståndsekvation för betong
$B$	Parameter för residualhållfasthet
$B0, B1$	Parametrar för tillståndsekvation för betong
$D1$	Parameter för RHT- modellen
$M$	Parameter för residualhållfasthet
$N$	Parameter för brott-flytyta
$T1$	Parametrar för tillståndsekvation för betong
$Y$	Flytspänning
$Y^*$	Flytspänning normaliserad mot tryckhållfasthet

## Romerska gemener

$b$	Bredd
$f_c$	Tryckhållfasthet för betong
$f_{ct,sp}$	Spräckhållfasthet för betong
$f_s$	Skjuvhållfasthet för betong
$f_t$	Draghållfasthet för betong
$h$	Höjd
$l$	Längd
$n$	Parameter för tillståndsekvation för betong
$p$	Tryck
$p^*$	Tryck normaliserad mot tryckhållfasthet

## Grekiska tecken

$\alpha$	Parameter för töjningshastighetsberoende i tryck
$\delta$	Parameter för töjningshastighetsberoende i drag
$\rho$	Densitet
$\varepsilon$	Töjning
$\phi$	Diameter
$\sigma$	Spänning
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3,$	Huvudspänningar

# 1 INTRODUKTION

Betongkonstruktioner är det främsta skyddsmaterialet mot vapenverkan. När en bomb exploderar utbreder sig en tryckvåg och splitter frigörs från bombens hölje. När splitter kommer farande mot en konstruktion med en hög hastighet tränger splittret in i betongen och orsakar stor skada, med kraterbildning och uppsprickning som följd. Enligt Räddningsverkets skyddsrumregler skall skyddsrummet tåla ”verkan av en tryckvåg motsvarande den som åstadkoms av en 250 kilograms minbomb med 50 viktprocent trotyl som briserar i det fria 5,0 meter från skyddsrummets utsida vid fri tryckavlastning”, dessutom skall skyddsrummet, ”utan märkbar risk för de skyddsökande att omkomma eller allvarligt skadas, även kunna tåla verkan av splitter från en brisad”, från Ekengren (1998).

Stötvågen karakteriseras av våg med en mycket distinkt vågfront som rör sig i ett medium, där mediets egenskaper ändras kraftigt när denna vågfront framskrider, se Johansson (2002). Karaktären av en stötvåg är beroende på vart explosion sker. Exempelvis, i fallet då bomben exploderar i markhöjd, reflekteras stötvågen omedelbart, med följden att energin i stötvågen blir ungefär dubbel så stor än om den hade briserats i luften. I tidigare samarbetsprojekt mellan Chalmers och Räddningsverket har luftstötvågens betydelse för armerade betongkonstruktioner studerats, se Johansson (2000) och Leppänen (2002). En viktig aspekt vid impulsbelastning är den korta belastningstiden. Om lasten påförs tillräckligt snabbt kan en del av konstruktionen gå till lokalt brott medan en annan del av konstruktionen inte har uppfattat att lasten har påförts. Detta medför att konstruktionens respons kommer att avvika sig vid stötvågs- och splitterbelastning.

Frågeställningen i denna rapport är hur splittersskuren påverkar betongens material egenskaper, exempelvis hållfasthet eller sprickbildning. När betong utsätts för en splitterbelastning påverkas dess energiupptagningsförmåga, vilket har studerats av Nordström (1992, 1993, 1995). Energiupptagningsförmågan bestäms genom att integrera lastnedböjningskurvan. Splittertäthet, storlek och hastighet är viktiga parametrar för att bestämma den. Försök av Nordström visar att betongplattorna, när, efter beskjutning med splitter, belastades med en statisk punktlast ökade betongens seghet. Den ökade segheten förklaras med att stöten från splitterbelastningen medför att vidhäftning reduceras kraftig mellan betong och armering, vilket leder till att armeringen kan glida. Medan för en platta som inte belastas med splitter blir töjningarna i armeringen lokaliserade runt en eller fåtal sprickor. Den ökade segheten resulterar i en högre energiupptagningsförmåga, dock blir maxlasten mindre då betongplattor utsätts för splitterbelastning. Generellt sätt är spridningen stor när splitterstudier genomförs. Klara samband är således svårt att dra gällande splittertäthet, storlek och hastighet. Dock har de oskadade plattorna generellt lägst energiupptagningsförmåga, och med ökad splittertäthet ökar även avskalningen, vilket påverkar energiupptagningen.

Byggnader är inte utsatta enbart för splitterbelastning från en bomb detonation. Från bomben utbreder sig en stötvåg och splitter. Experiment har visat att en betongkonstruktion som utsatt både för en stötvågs- och splitterbelastning har mindre bärförmåga än om den enbart vore utsatt för stötvågsbelastning. I Forsén (1997) visades att en 200 mm betongplatta kunde slås sönder av en koncentrerad splitterskur i kombination med stötvåg på 14 m avstånd, men motsvarande platta som belastades

enbart med en stötvåg från 5 m avstånd slogs inte sönder. Impulstätheten är betydligt lägre för splitterskuren jämfört med impulstätheten från en stötvåg. Den ökade skadan kan inte enbart förklaras med en ökad impulstäthet, eftersom ökningen blir relativt låg. Enligt Forsén (1991), antas den ökade skada bero på en kombination av splittrets eroderande effekt på betong och ökad impulstäthet.

Dock är skademekanismerna för splitterbelastning inte kända i detalj. Tidigare splitterstudier har varit huvudsakligen inriktade på strukturell nivå, där balkar, väggar eller hela konstruktioner har analyserats. För att karakterisera betongens egenskaper, är det högst väsentligt att bilda en uppfattning om skadan i betongen. Denna rapport lyfter fram betongens materialegenskaper då den har blivit utsatt för en kombinerad splitter- och stötvågsbelastning. För att studera denna belastning har experiment utförts på FOI. I detta experiment har stötvågen och splittlerinverkan studeras, och dess direkta skadeverkan samt den tryckvåg som alstras från direktkontakten från splittret. Ifall betongen har en fri baksida bildas en dragvåg då tryckvågen reflekteras. Denna dragvåg skadar betongen på baksidan, vilket har inte varit av intresse i denna experimentella studie. Därför planerades försöksuppställningen så att dessa effekter inte skulle uppkomma, dock har resultat från experimenten visas att randeffekter inte kan försummas eftersom viss reflektion fås alltid mellan två kroppar som inte ligger perfekt an.

Vidare, har en del förenklingar gjorts jämfört med det verkliga belastningsfallet då ett skyddsrum blir utsatt för splitter och stötvågsbelastning. Splittret har förenklats till sfäriska kulor och för att få en jämn inträngningsdjup har ballaststorleken i betongen begränsats till stenstorlek 8 mm. Dessa förenklingar har gjorts för att få tydliga randvillkor. Dessutom kan det förenklade belastningsfallet simuleras och verifieras på ett adekvat sätt med numeriska metoder. Då förståelsen för det förenklade belastningsfallet har erhållits kan komplexiteten i numeriska analyser ökas.

Då betongen utsätts för en kraftig stöt, kan antingen betongen kompakteras och mikrosprickor bildas i betongen och därmed påverkas betongens tryck- och draghållfasthet. Frågor som, hur betongens tryck- och draghållfasthet påverkas av en splittersskur som träffar en betongkropp, hur mikrosprickbildningen ser ut efter att en splittersskur har träffat betongkroppen, samt hur ser avskalningen ut och hur mycket blir inträngningsdjupet har studerats. Vidare en parameter som är av intresse, hur densiteten påverkas då betongen utsätts för en splitterbelastning.

En annan viktig målsättning i detta arbete, förutom att öka förståelsen för skademekanismer, är att utvärdera hur (studera möjligheter och begränsningar) splitttrinängning i betong beaktas med numeriska metoder. Programmet AUTODYN har nyttjas i de numeriska analyserna.

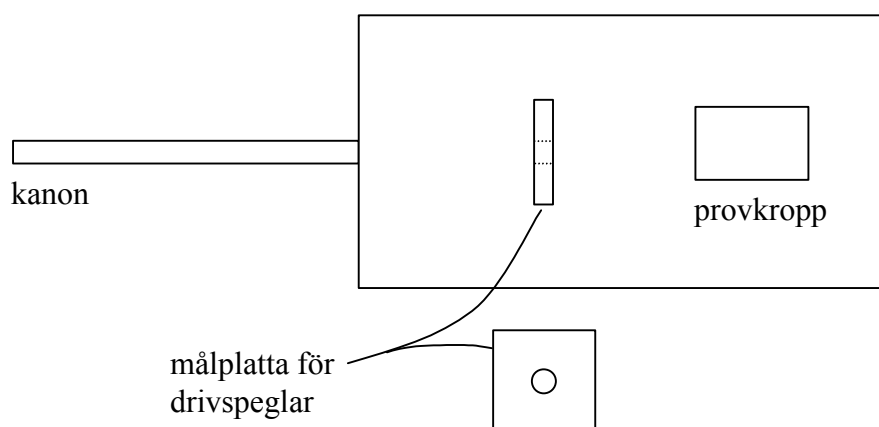
## 2 FÖRSÖKSUPPSTÄLLNING

Experimenten delades i två olika uppsättningar. En uppsättning där enstaka splitter avfyrades mot en betongkropp och en uppsättning där en splittersvärm belastades mot en betongkropp.

Själva skjutningarna har genomförts på FOI, Grindsjön, medan gjutning och utvärdering av experimenten har genomförts på Chalmers Tekniska Högskola. Sågning, planslipning och spräckprov har utförts på Färdig Betong. Tunnfilmslipningen gjordes på MINOPREP.

### 2.1 Enstaka splitter

Försöksuppställningen för de enstaka splitterskjutningarna visas i Figur 2.1. I skjutningen användes en 30 mm kanon där projektilen avfyrades med olika mängder med krut för att variera splitterhastigheten. Projektilen består av ett splitter med diametern på 8 mm (SKF kullager kula) som sitter fast mellan två drivspeglar. Drivspegeln har en diameter på 30 mm. När projektilen når kanonens mynning separerar drivspeglarna och träffar ett mål av stål. I målet finns ett hål där splitterkulan kan passera och träffa provkroppen. Provkropparna var av betong med dimensionerna på 750 x 375 x 500 mm, dessa beskrivs mer i detalj i kapitel 3.1. Träffytan var 750 x 375 mm.



Figur 2.1 Försöksuppställning för enstaka splitter.

Hastigheten hos splitter mättes genom att mäta tidsskillnaden då kulan passerar två ljusstrålar av laser. När kulan passerar ljusstrålen fås en registrering och hastigheten kunde bestämmas.

I Tabell 2.1 visas resultat av hastighets mätningar för de åtta skotten. Hastigheten varierade mellan 1 754 och 2 000 m/s i försöken. För att kalibrera in rätt hastighet varierades krutmängden. Första skottet hade den största krutmängd på 110 g och fick en hastighet på 2 000 m/s. Därefter minskades krutmängden till 90 g och hastigheten

blev för det skottet 1754 m/s. Den önskade hastigheten för försöken var 1 800 m/s, vilket motsvarar en inträngningsdjup på drygt 50 mm, således ökades krutmängden till 95 g, och hastigheten översteg 1 800 m/s. För de för resterande 6 skott användes krutmängden 95 g och hastigheten varierade mellan 1 831 och 1 886 m/s för dessa skott, dock, för skott 7 kunde inte hastigheten mätas på grund av ett kabelfel.

Tabell 2.1 Hastighet hos enstaka splitter.

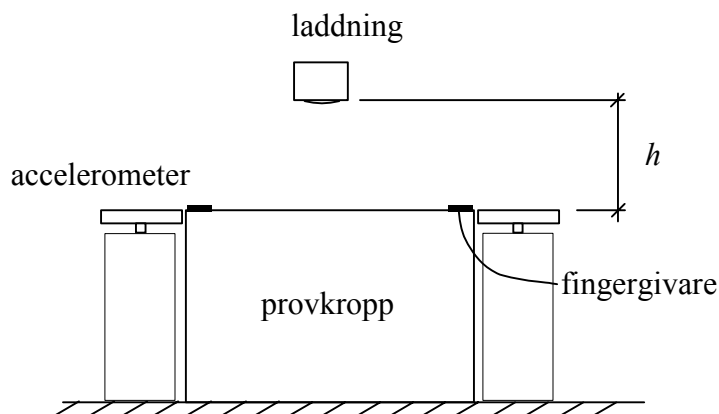
Skott nr.	Hastighet [m/s]	Block nr.	Tid [ $\mu$ s]	Krut [g]	Projektil vikt [g]
1*	2000	9	250	110	26.87
2	1754	9	258	90	26.58
3	1852	8	270	95	26.77
4	1879	8	266	95	26.83
5	1852	8	270	95	26.88
6	1831	11	273	95	26.82
7**	-	11	-	95	26.88
8	1886	11	265	95	26.84

\* Skott nr.1: drivspiegel separerade inte tillräckligt, hela projektilen slog i betongblock.

\*\* Skott nr.7: ingen tid kunde registreras - kabelfel

## 2.2 Splittersvärm

I den andra försöksuppsättningen avfyrades en splittersvärm mot ett betongblock. Blocken placerades på hårt underlag (betong) och höjden på laddningen varierades, se Figur 2.2 (i kapitel 3.2.2 visas fotografier).



Figur 2.2 Försöksuppställning med splittersvärm.

Splitterladdningen tillverkades genom att gjuta fast stålkulor på en konvex ända av en cylinder. Totalt 7 laddningar användes, varav 5 var oktol laddningar och 2 var hexotol laddningar med vikten på vardera laddningen var 1.3 kg. Uppställningen för de sju försöken redovisas i Tabell 2.2.

Provkropp 1 användes för att kalibrera in rätt hastighet för splittersvärmen. Där två laddningar användes. I den första beskjutningen användes träfiberplattor (tretex) för att dämpa hastigheten hos splitter, totalt 4 skivor med totalhöjd på 51 mm. Hastigheten för denna skjutning blev 1 460 m/s. För att öka hastigheten användes inte några träfiberplattor i den andra skjutningen, samt de övriga laddningarna.

För att bestämma hastighet nyttjades både fingergivare och accelerometrar, se Figur 2.2. Med denna metod fås medelhastigheten för splittersvärmen. Dock visade det sig vid utvärdering av hastigheten hos splittersvärm, att det var svårt att bestämma hastigheten. Detta beror på att stötvågen träffar provkroppen före splittersanslaget. För laddning 6 och 7 kunde inte hastigheten mätas eftersom triggern inte fungerade från ljusblixten.

För att variera splittertätheten varierades höjden där laddningen avfyrades, höjden var mellan 0.6 m och 1.0 m. I försök med laddning 3 blev kanterna svårt skadade. För att minska risken för att få för stora kantskador för de resterande blocken placerades en skyddsram av stål runt om betongen. Stålråmen tillverkades av L-profiler med godstjocklek på 10 mm och 70 mm täckning för betongen.

Tabell 2.2 Hastighet och försöksuppställning med splittersvärm.

Laddning nr.	Provkropp nr.	Hastighet [m/s]	Sprängämne	Höjd [m]	Skyddsram
1*	1	1450	oktol	1.0	NEJ
2	1	1680	oktol	1.0	NEJ
3	2	1660	oktol	0.8	NEJ
4	3	1650	Hexotol	0.6	JA
5	4	1650	Oktol	0.7	JA
6**	5	-	Oktol	0.7	JA
7**	6	-	Hexotol	0.6	JA

\* Laddning nr.1: 4 skivor träfiberplattor med totalhöjd på 51 mm fästes under laddningen för att minska hastighet hos splittersvärm.

\*\* Laddning nr.6 och nr.7: Hastigheten kunde inte registreras eftersom triggern från ljusblixten inte fungerade.

Eftersom hastigheten är svår att bestämma, tillverkades förutom de 7 laddningar som provkropparna blev beskjutna med ytterligare 2 oktolladdningar med vikten 1.3 kg. Dessa laddningar hade enbart en splitter kula och avfyrades mot en stålskiva. Dock gav dessa ingen ytterligare information för att bestämma splitterhastigheten.



### 3 Analys av experiment

Efter splitterskjutningarna på FOI transporterades samtliga provkroppar till Chalmers. Där provkropparna vägdes och fotograferades. Därefter mättes inträngningsdjup, kraterdiameter och kraterdjup.

För att studera hur materialegenskaperna förändras har borrhärdar borrats ur provkropparna på varierande höjder, från vilka tryck- och spräckprov har genomförts. Avskalning och sprickbildning har studerats genom att klyva provkropparna, samt har tunnfilmslipning utförts. Utöver dessa analyser har standard materialprover tagits från betongen, vilka redovisas i appendix A.

Syftet med analyserna var att studera hur materialegenskaperna förändras och hur en skadegrad kan uppskattas för betong vid splitterbelastning. Med sprickbilden tillsammans med tryck- och dragprov på splitterbelastade provkroppar var målet innan experimenten utfördes att skapa en bild av skadegraden av betongen.

Det går att diskutera vad skadegrad är egentligen: en direkt jämförelse med tryckproven ger ju inte någon resthållfasthet för betongen, utan en relativ ändring av den enaxiella tryckhållfastheten. Medan sprickbilden kan mekanisk kopplas till skadegraden, dock betydligt svårare att kvantifiera. Därför är det viktigt att båda provningarna utförs för att få en bättre bild av vad som händer med betongen då den utsätts för splitterbelastning.

#### 3.1 Provkropparna

Provkropparna är av betong med höjd på 500 mm. I appendix A redovisas materialegenskaperna för betongen. Träffytan var olika för enstaka splitterskott och för splittersvärm. För de enstaka splitterskotten hade provkroppar dimensionerna 750 x 375 x 500 mm<sup>3</sup> (träffytan var 750 x 375 mm<sup>2</sup>). För experiment med splittersvärm hade provkropparna dimensionerna 750 x 750 x 500 mm<sup>3</sup> (träffytan var 750 x 750 mm<sup>2</sup>). Samtliga provkroppar är lätt armerade med  $\phi 6$  cc 120 runt varje provkropp. För hantering och transport av provkroppar fästes totalt 4 lyftöglor efter gjutning på två motsatta sidor om plattan.

Provkropparna vägdes före och efter beskjutning. I Tabell 3.1 redovisas massan för varje provkropp (För provkropp har vikten ökat med 0.5 kg, vilket är troligtvis ett mätfel).

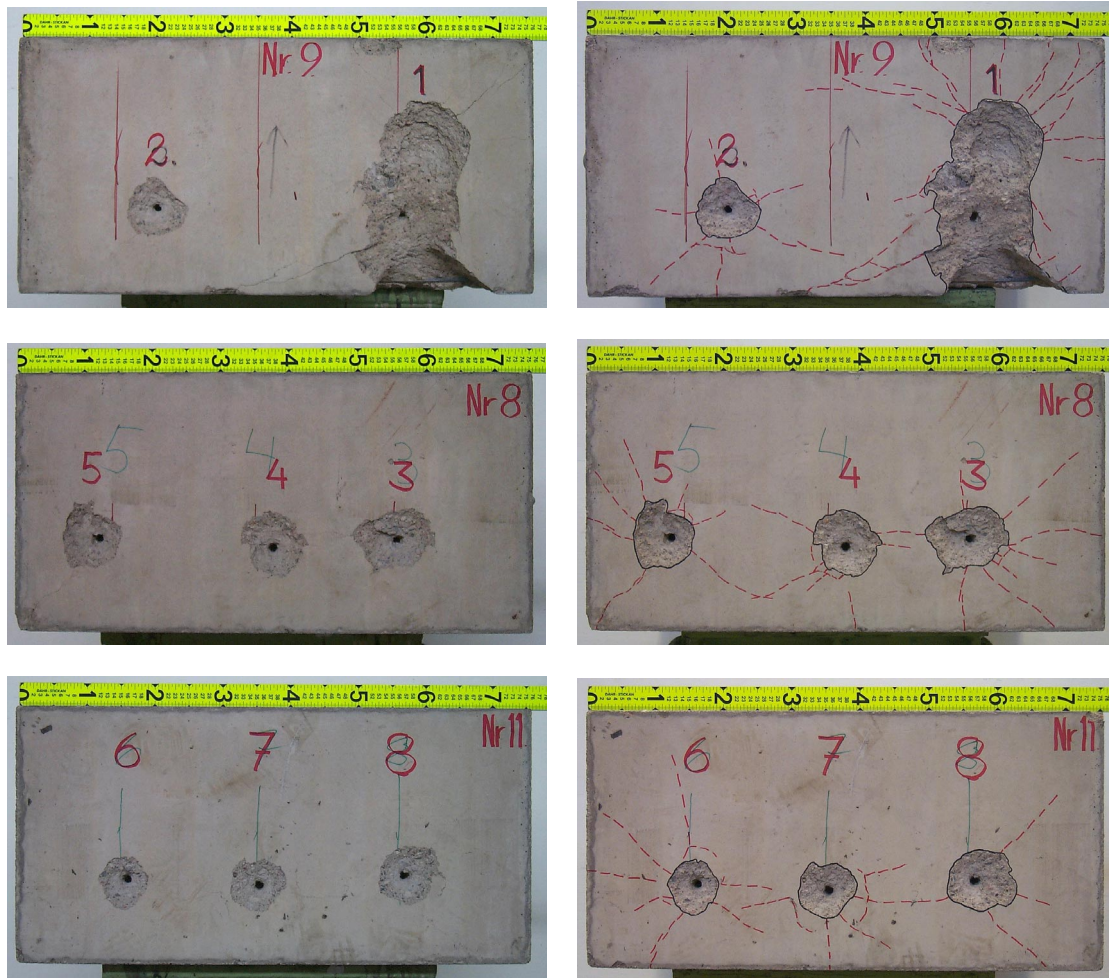
Tabell 3.1 Vikt hos provkropparna före och efter skjutning.

Provkropp	Massa före [kg]	Massa efter [kg]
1	629	618
2	628.5	617.5
3	627	622.5
4	625	619
5	625.5	618.5
6	630.5	619
7	629	629
8	316.5	316
9	313	313.5
10	315	313.5
11	314	313

## 3.2 Fotografier efter beskjutning av provkroppar

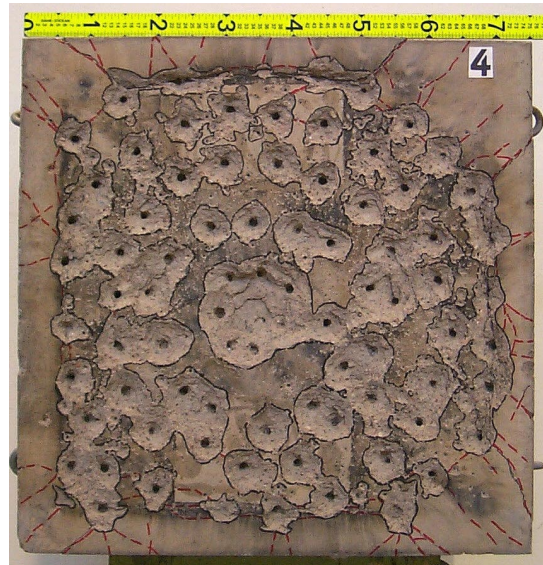
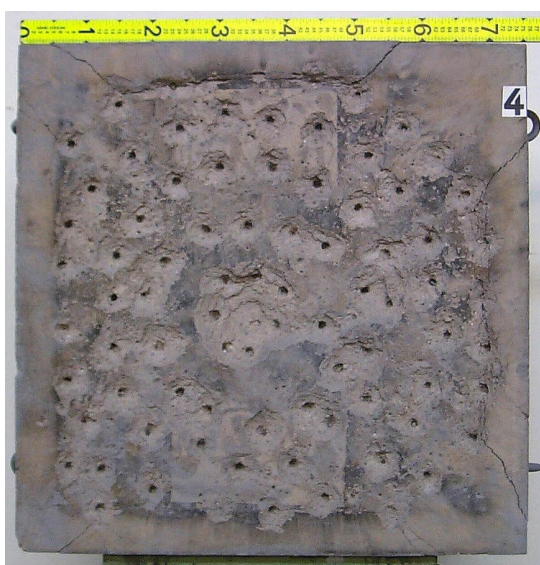
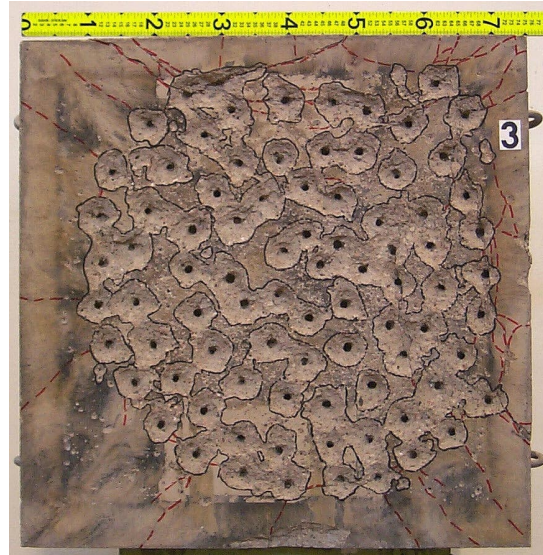
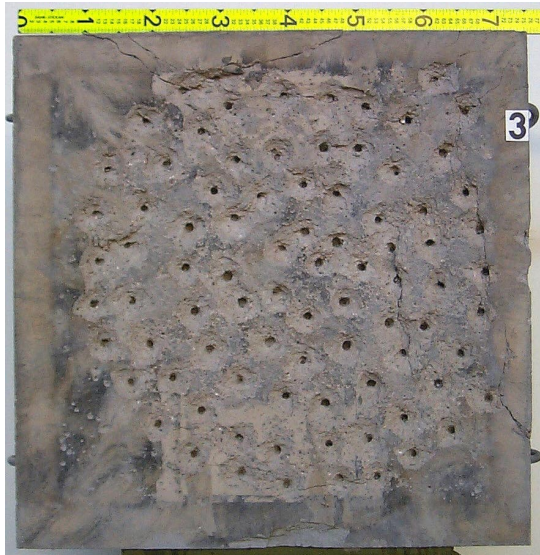
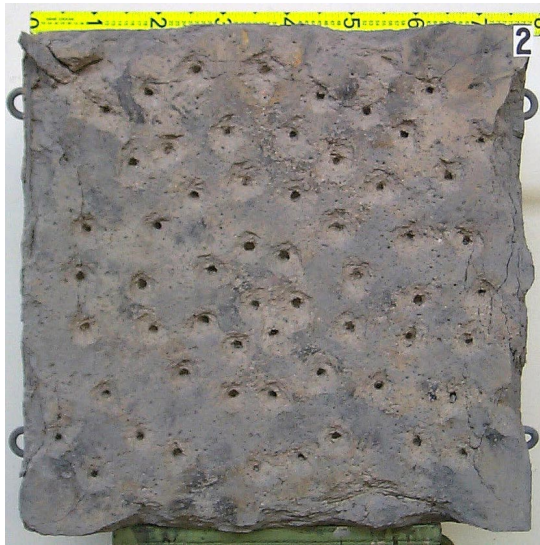
Försöken genomfördes på FOI, Grindsjön. Efter transport till Chalmers fotograferades samtliga provkroppar. För att synliggöra sprickor ritades de upp och provkropparna fotograferades på nytt, se Figur 3.1 och Figur 3.2.

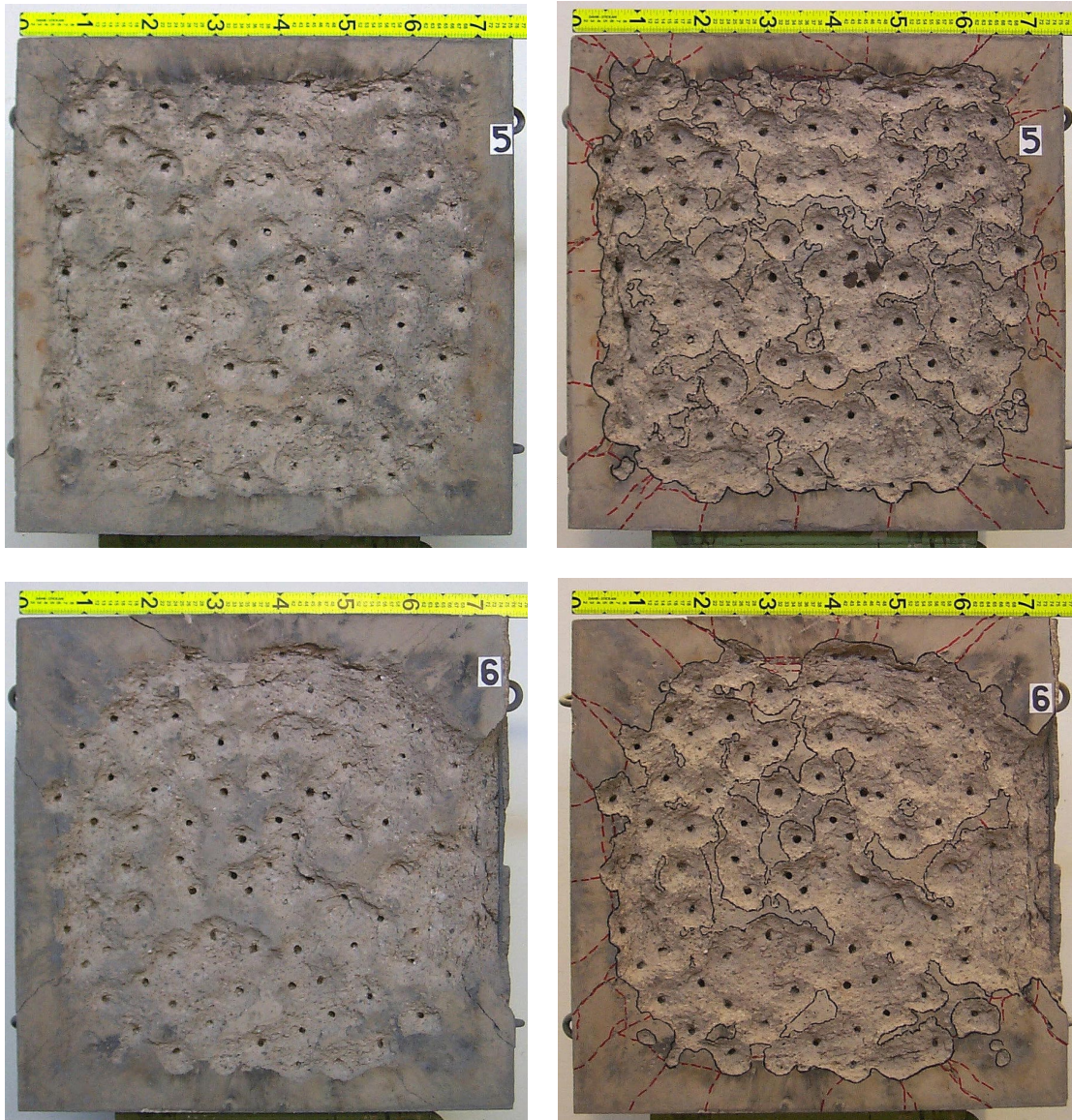
### 3.2.1 Enstaka splitter



Figur 3.1 Fotografier efter beskjutning med enstaka splitter, med och utan sprickmarkering.

### 3.2.2 Splittersvärm





Figur 3.2 Fotografier efter beskjutning med splittersvärm, med och utan sprickmarkering.

### 3.3 Inträngningsdjup, kraterdjup och kraterdiameter

Inträngningsdjupet och kraterdjup mättes med ett elektroniskt skjutmått efter rester att betong hade blåsts av med tryckluft. Kratrarna som bildades vid splitterbelastningen är icke perfekt cirkulära och därmed för varje krater har ett genomsnittsvärde mäts upp med noggrannhet på 5 mm. I Tabell 3.2 redovisas medelvärden för inträngningsdjup, kraterdjup och kraterdiameter för samtliga mätningar. I appendix B redovisas varje mätning separat.

För de enstaka splitterskotten varierade inträngningsdjupet mellan 52.5 och 57 mm. För anslagshastigheten på 1742 m/s, vilket var den lägsta, blev inträngningsdjupet 52.5 mm (skott nr. 2). För skottet med den högsta anslagshastighet, vilket var 2000 m/s blev inträngningsdjupet 53.5 mm (dock separerade inte drivspegeln för detta

skott, se Figur 3.1). De övriga skotten hade en anslagshastighet som varierade mellan 1831-1886 m/s. Inträngningsdjupet för dessa varierade mellan 53.5 mm och 57 mm.

För försöken med splittersvärm varierade medelvärdet för inträngningsdjupet mellan 32.5 mm och 35.1 mm. Inträngningsdjupet för de flesta träffarna varierar mellan 30 och 40 mm. Några enstaka splitter trängde djupare. I appendix redovisas varje mätpunkt och dess placering i provkroppens plan. Generellt, så var inträngningsdjupet som mest i centrum för anslaget, där inträngningsdjupet var upp till 50 mm.

Kraterdiameter är ca 50 mm för splittersvärm. För de enstaka skotten blir kratern större med en diameter på ca 90 mm. Dock var hastigheten något högre för de enstaka skotten. Men, det förklarar inte enbart den stora skillnaden i kraterstorlek. En trolig orsak är att det skapas svärmeffekt vid anslaget av flera splitter och en mothållande kraft skapas i radiell riktning som minskar kraterstorleken.

Tabell 3.2 Medelvärde för inträngningsdjup, kraterdjup och kraterdiameter.

	Inträngningsdjup [mm]	Kraterdjup [mm]	Kraterdiameter [mm]
<b>Enstaka skott</b>			
1	53.5	-	-
2	52.5	14	84
3	57	16	98
4	54	15	93
5	56.5	15	93
6	56.5	12	74
7	53.5	14	80
8	54	13	92
<b>Splittersvärm</b>			
2	35.1	52.8	16.1
3	32.5	48.5	14.0
4	33.4	52.7	15.8
5	34.3	59.2	17.8
6	33.6	54.6	17.6

### 3.4 Strukturell förändring

För att studera betongens strukturella förändring både på mikro- och makronivå har betongkropparna sågats mitt itu, samt har borrhävar tagits ur kropparna. Ur dessa borrhävar har tryck- och spräckprov genomförts för att studera ändring i hållfasthet hos betongen. Vidare har tunnfilmslipning genomförts för att studera sprickbildning på mikronivå.

Vid tunnfilmslipning impregneras provkroppen med flurocerande plast innan sågning. Detta görs för att framhäva sprickor. Därefter används polariserande ljus (UV-ljus) för att studera sprickbildning. Denna metod nyttjas för mindre provkroppar, men dock gjordes försök att studera sprickor för de sågade provkropparna med flurocerande plast (Epodye) för de stora provkropparna. Vid belysning med UV-ljus visade det sig

att metoden inte var tillämpbar för de stora provkropparna och därför användes den traditionella metoden med att spola vatten. Då vattnet avdunstar tar det längre tid för vattnet att avdunsta där sprickor finns i betongen och därmed går det att lokalisera dessa.

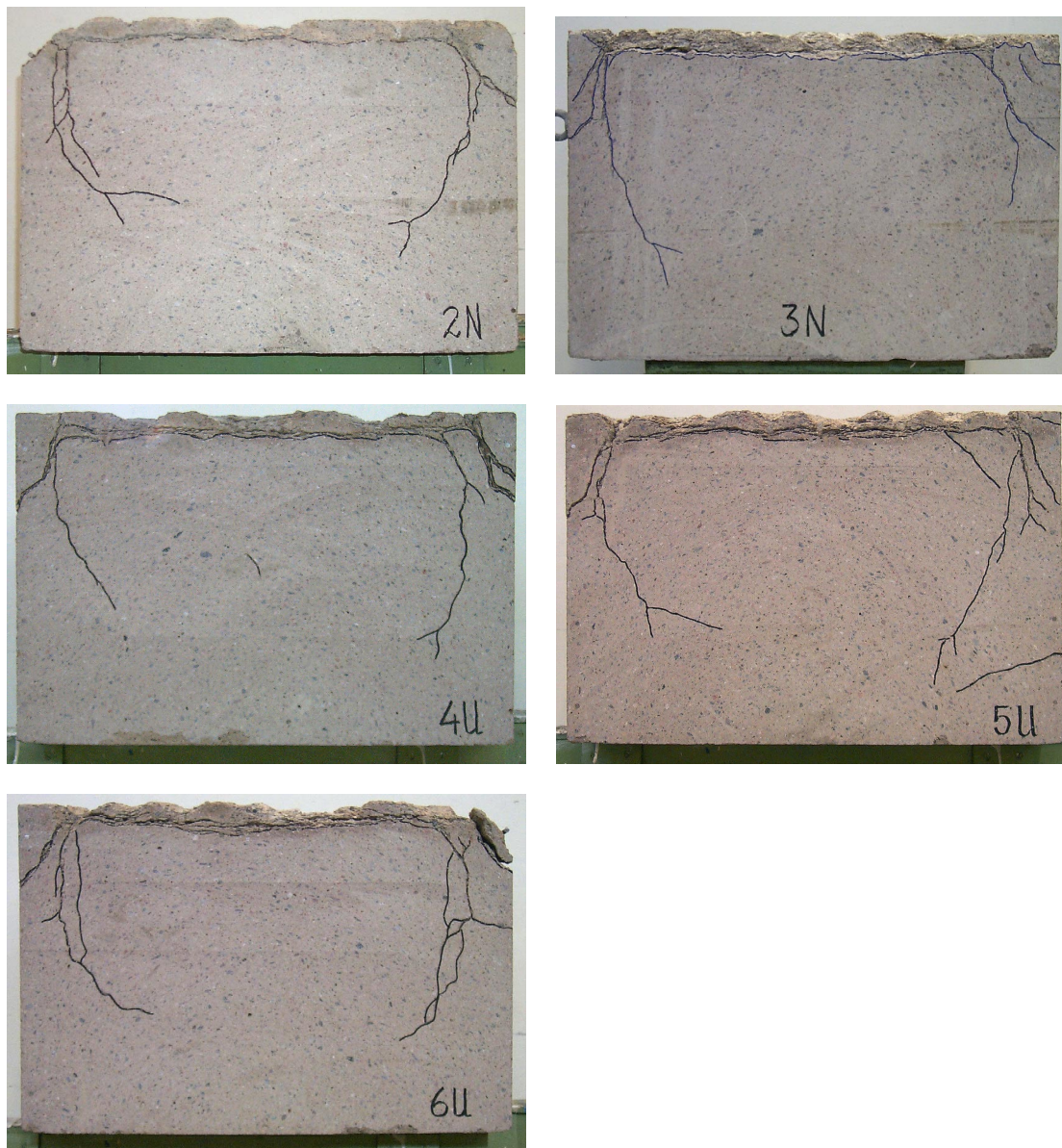
För provkropp 3 har en fullständig analys genomförts, vilket innebär att den först har sågats mitt itu och därefter har hela provkroppen borrats (i två riktningar). Sprickplan, tryck- och spräckhållfasthet har tagits fram, samt tunnfilmslipning genomförts. De övriga provkroppar belastade med splittersvärm har sågats mitt itu, samt verifierande prover tagits för att visa det generella beteende är likvärdig den provkropp 3 har. En provkropp med enstaka splitter skott har sågats mitt itu, samt tunnfilmslipning genomförts.

### 3.4.1 Klyvning av provkropparna

Den kraftiga sprickbildningen som orsakades av splittersbelastningen medförde att borrkärnorna gick av vid borrning av cylindrar. För att närmare studera sprickbildningen klyvdes provkropparna 2-6 som var belastade med splittersvärm och en provkropp 8 som var belastad med singelskott. I Figur 3.3 visas tvärsnitt av de klyvna kropparna, vilka var belastade med enstaka skott och i Figur 3.4 för splittersvärmen. Betongkroppar belastade med splittersvärm visar en tydlig skålformad sprickplan. Uppsprickning sker vid kanterna och ca 1/3 från botten. Provkroppar belastade med splittersvärm får en tydlig avskalad yta, där höjden för avskalningen blev ca 50 mm för samtliga provkroppar belastade med splittersvärm.



Figur 3.3 Tvärsnitt av provkroppar belastade med enstaka splitter.

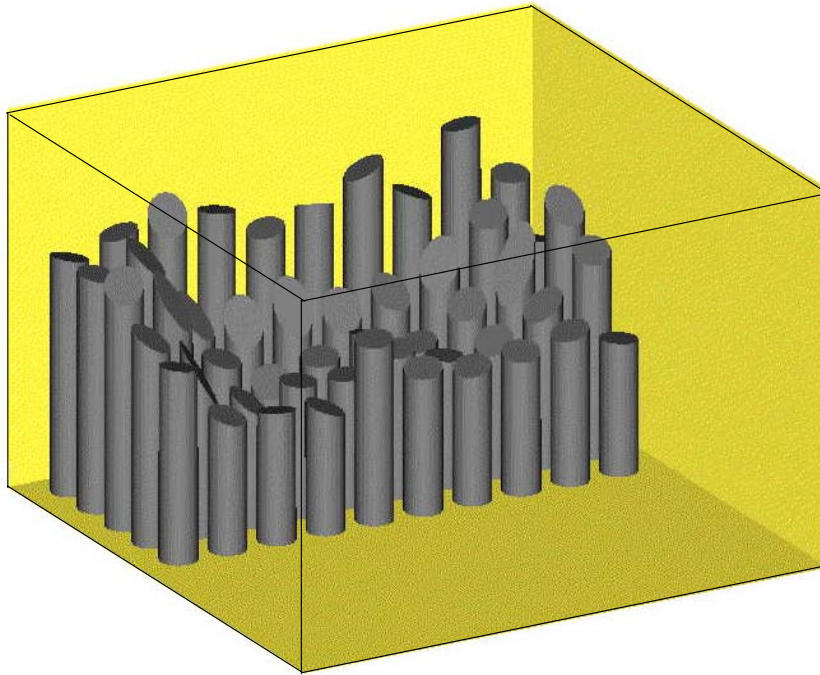


Figur 3.4 Tvärsnitt av provkroppar belastade med splittersvärm.

### 3.4.2 Borrkärnor

Efter klyvning av provkropparna borrades 50 mm:s borrkärnor ur vardera halva av betongkroppen. För den ena halvan borrades kärnorna i vertikal riktning och för den andra halvan i horisontell riktning. Borrschema framgår i appendix C. De flesta borrkärnorna gick dock av vid borrningen. Mätning utfördes för de borrkärnor som gick av för att bestämma den globala sprickbildningen, mätningen redovisas i appendix C. I Figur 3.6 visas de vertikala urborrade betongkärnorna. En tydlig sprickplan kan urskiljas från denna figur. Denna sprickplan uppstår troligtvis vid reflektion av stötvågen när den når ränderna. Trots att betongen låg på hårt underlag har en spricka uppstått vid botten av provkroppen. Orsaken till sprickan kan bero på att provkroppen inte var fast förankrad till underlaget och kan lyfta, dessutom är betongblocket och underlaget inte perfekt jämt, och därmed kan en del av tryckvågen reflektera när den når botten av provkroppen.





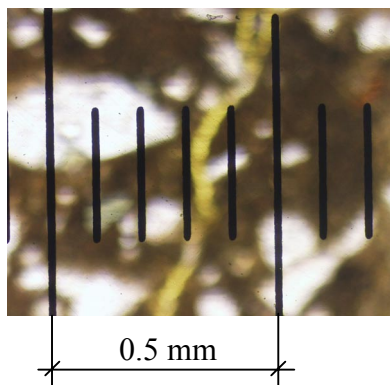
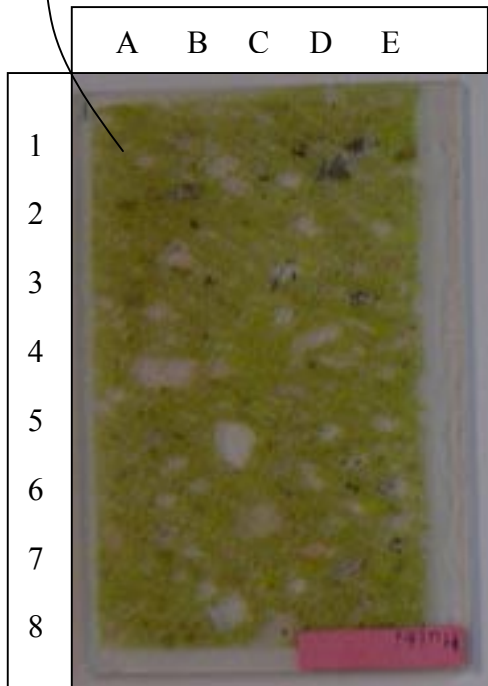
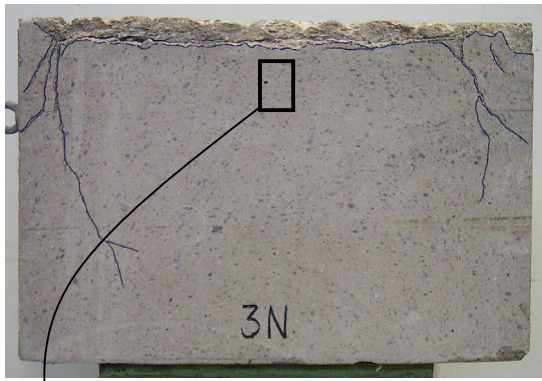
Figur 3.5 Sprickplan för splittersvärm, framtagen från de urborrade cylindrar.

### 3.4.3 Tunnfilmslipning

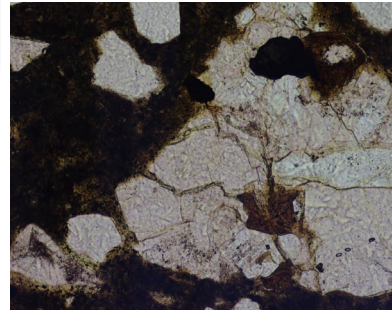
För att studera den strukturella förändringen hos betongen belastad med splitter har tunnfilmslipning genomförts. Här jämförs tre prover, en belastad med splittersvärm (provkropp 3), en med enstaka splitter (skott nr.6) och som referens: en provkropp, vilken var obelastad.

Cylindrar har borrats ur betongkropparna, vilka har preparerats för tunnfilmslipning, där provstorleken är 90 x 50 mm och tjocklek på tunnfilm är 25  $\mu\text{m}$ . För splittersvärmen är provkroppen tagen ut från ett avstånd som är mellan 8 – 17 cm från anslagsytan; betongen närmast splitterbelastning är så pass skadad att det inte gick att ta ut några prover från ett avstånd närmare än så. Däremot, för singelskotten har proven tagits ut ur ett hål där splitterkulan har träffat. I Figur 3.6, Figur 3.7 och Figur 3.8 visas fotografier tagna från mikroskop från tunnfilmslipningen. För förstärkning av detta har polariserad ljus nyttjats. Vidare, proven har impregnerats med flurocerande plast innan sågning och tunnfilmslipning. Detta görs för att porer och sprickor skall framträda tydligare. Efter tunnfilmslipningen har provet täckts med täckglas.

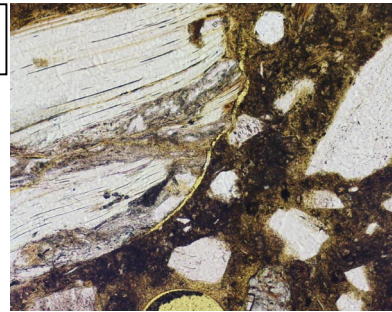
För splittersvärmen, visar resultaten från tunnfilmslipningen att betongen är oskadad från ett avstånd som är ca 12 cm från ytan där splitter har anslagit; vilket motsvarar nivå 5 i Figur 3.6. Från figuren kan de observeras att de mindre partiklarna i betongen krossas och sprickbredden är i storleksordning 0.02 mm. För singelskott är avståndet till den oskadade betongen något lägre, se Figur 3.7. Från en nivå på cirka 2 cm från botten av kraterdjupet är betongen oskadad. Dock, har en begränsad yta av betongen studerats. I Figur 3.3 visas att för betong som blivit skjuten med singelskott ”strålar” sprickor ut från botten av kratern.



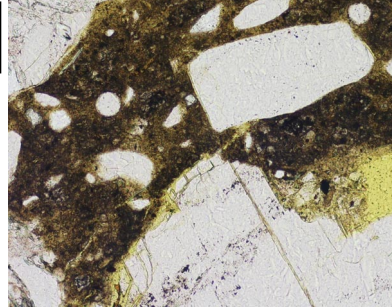
A1



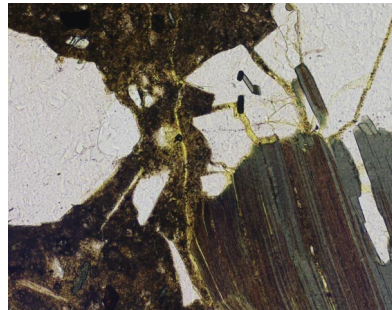
D2



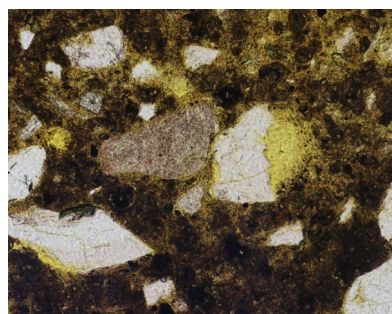
D3



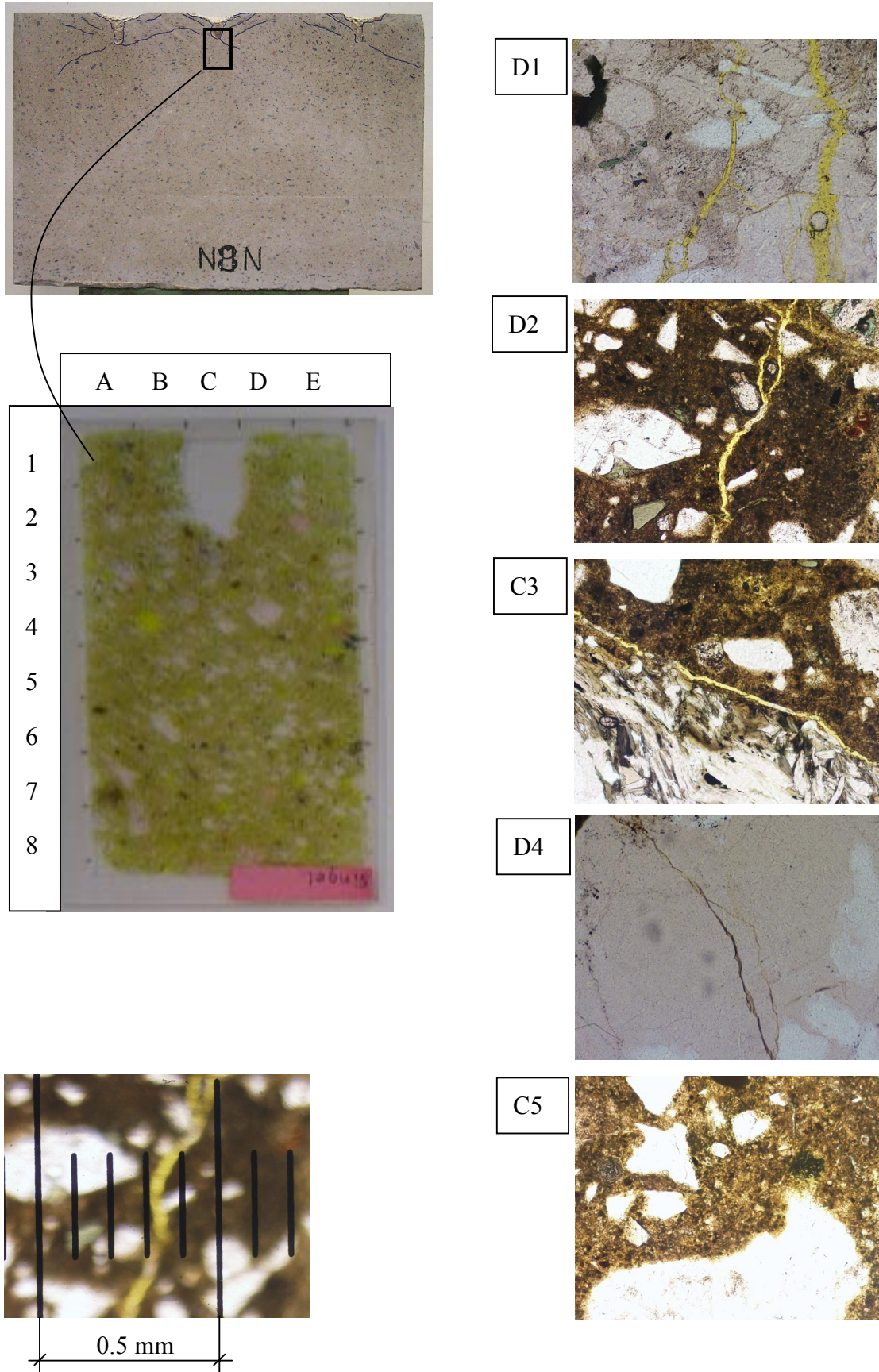
D4



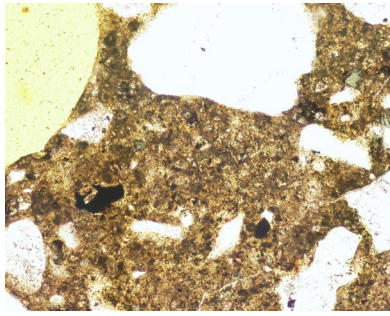
C5



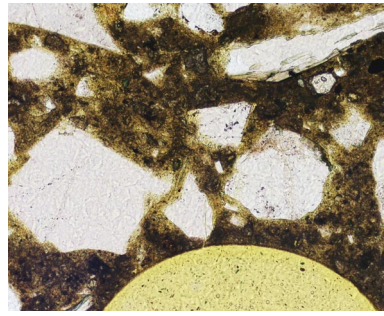
Figur 3.6 Tunnfilmslipning: sprickbildning för splittersvärm



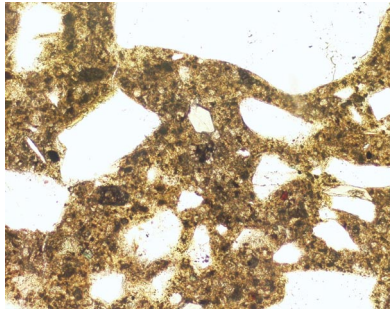
Figur 3.7 Tunnfilmslipning: sprickbildning för singelskott



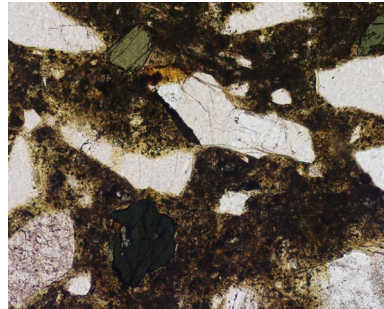
Singelskott, nivå (C6)



Splittersvärm, nivå 6 (B6)



Referens



Referens

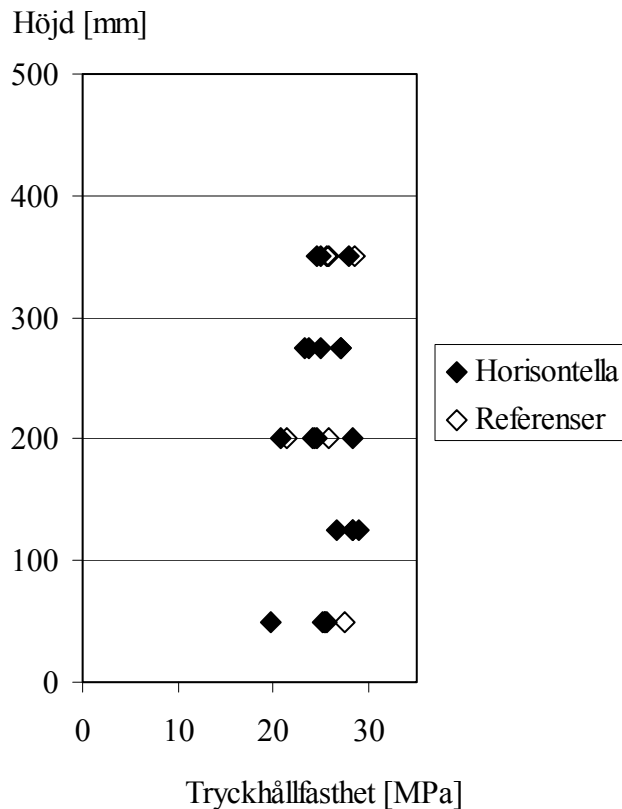
Figur 3.8 Tunnfilmslipning: referenser och sprickfri betong från singelskott och splittersvärm, jämför Figur 3.6 och Figur 3.7.

### 3.5 Tryckhållfasthet

För att studera ändring i hållfasthet hos splitterbelastad betong har cylindrar borrats ur de provkroppar som har belastats med en splittersvärm. För jämförelse har även referenscylindrar borrats och tryckbelastats för icke skjutna provkroppar. Dessa provkroppar har transporterats, utsätts för väder och vind på liknande sätt som de vilka var belastade med splitter.

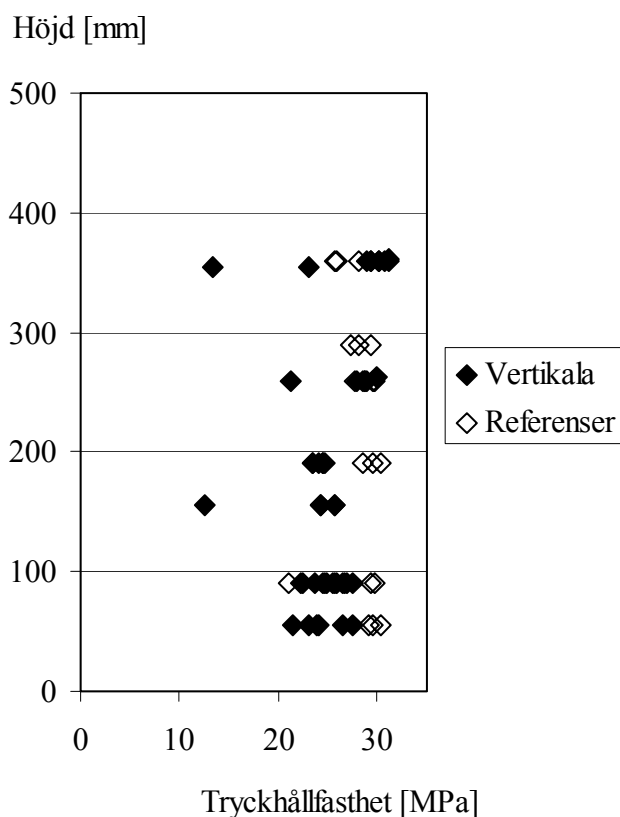
Vid borrning av provkropparna gick borrkärnorna av, se Figur 3.5. Från dessa har 50 x 100 mm tryckprover tagits ur, och tryckbelastats med en hastighet på 1.6 kN/s, vilket motsvarar en belastningshastighet på 0.1 MPa/s (standard belastningshastighet vid statisk belastning av tryckprover). För att minska på friktionen mellan provkropp och belastningsplatta nyttjades dubbla teflon strimlor.

Tryckproverna visar att betongens hållfasthet inte påverkas särskilt av splitterbelastningen strax under splitterbelastningen. Däremot påverkas hållfastheten i ränderna där reflektion av stötvågen har skett. I Figur 3.9 visas resultat från de horisontellt urborrade cylindrarna. Höjd 500 mm motsvarar anslagsytan. Tre referensprover är tagna på höjderna 50 mm, 200 mm och 350 mm. Resultaten från tryckproven visar att splitterbelastningen inte påverkar hållfastheten särskilt. Borrkärnor har tagits ur på nivåerna 50, 125, 200, 275 och 350 mm. Borrkärnor på nivån 425 mm kunde inte tas ut eftersom betongen var skadad.



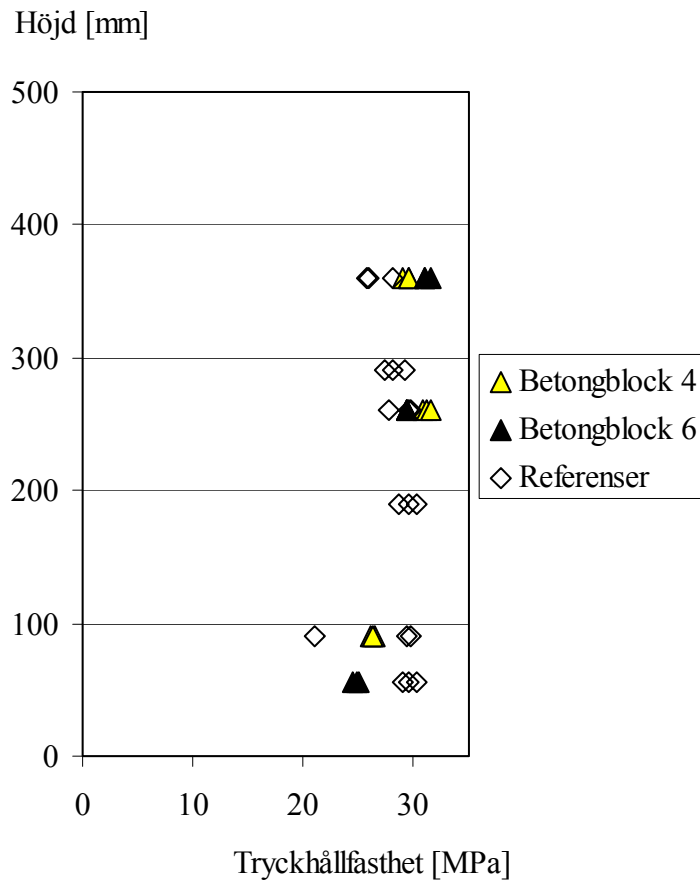
Figur 3.9 Tryckhållfasthet för horisontella cylindrar, betongblock 3.

Resultat från tryckproven för de vertikalt borrade cylindrarna från betongblock 3 visas i Figur 3.10. Tryckhållfastheten varierar beroende vart borrhölet tagits ut från betongblocken. Vid ränderna och för borrhölet nära det globala sprickplanet reduceras hållfastheten. Däremot, i centrum av betongblocket och nivån 360 mm fås liten höjning av hållfastheten jämfört med referensproverna. Denna höjning beror troligen på att betongen har kompakterats under splitterbelastningen. De två resultat vid nivån 350 mm (13 MPa och 23 MPa) och provningen vid nivån 260 mm (21 MPa) är tagna vid kanten av betongblocket (där det globala sprickplanet går). Tryckprovet med hållfastheten på 13 MPa hade dessutom en synlig spricka innan provning, dock tryckbelastades denna ändå. I appendix D redovisas protokoll från tryckprovningarna där samtliga resultat redovisas .

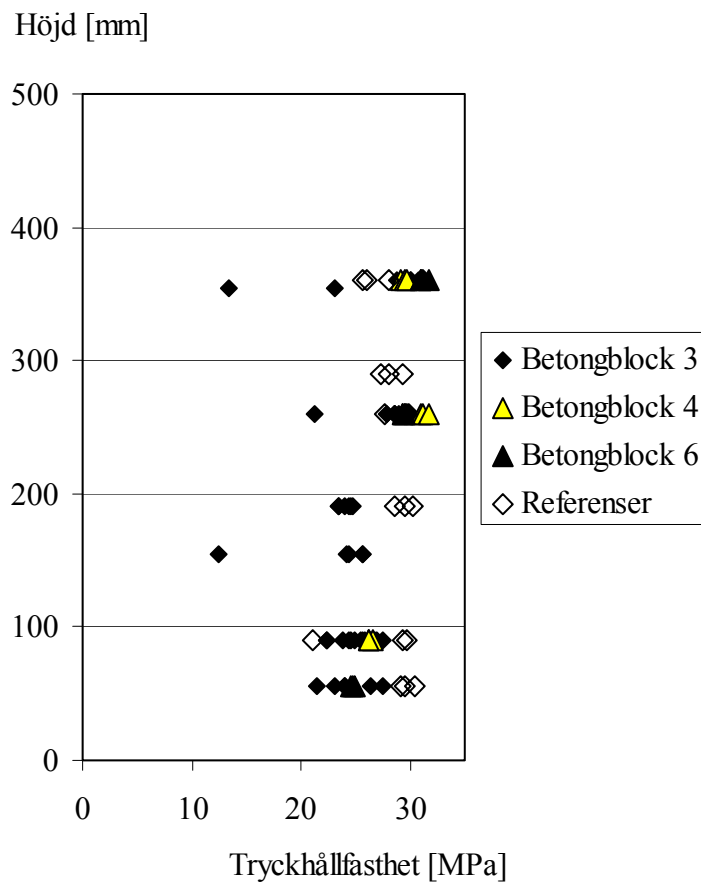


Figur 3.10 Tryckhållfasthet för vertikala cylindrar, betongblock 3.

För att verifiera resultaten har borrhärdar tagits ut från betongblock 4 och 6 från nivåerna 55, 90, 260 och 360 mm. Resultat från dessa tryckprover visas i Figur 3.11. Proverna är tagna i centrum av splitterbelastningsytan. Tryckproverna visar samma tendens som för betongblock 3, där hållfastheten är något högre än referenserna vid nivån 360 mm och vid i botten är hållfastheten reducerad. Tre prov har tagits ur vid varje nivå för båda betongblocken och hållfastheten var nästan identisk vid varje nivå för respektive betongblock. I Figur 3.12 visar resultat från tryckprov från samtliga vertikalt borrhärdade cylindrar för jämförelse.



Figur 3.11 Tryckhållfasthet för vertikala cylindrar, betongblock 4 och 6.

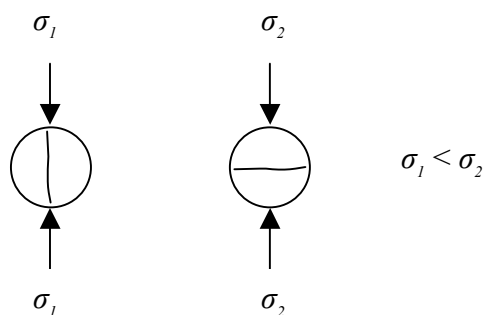


Figur 3.12 Tryckhållfasthet för samtliga vertikalt provade cylindrar.



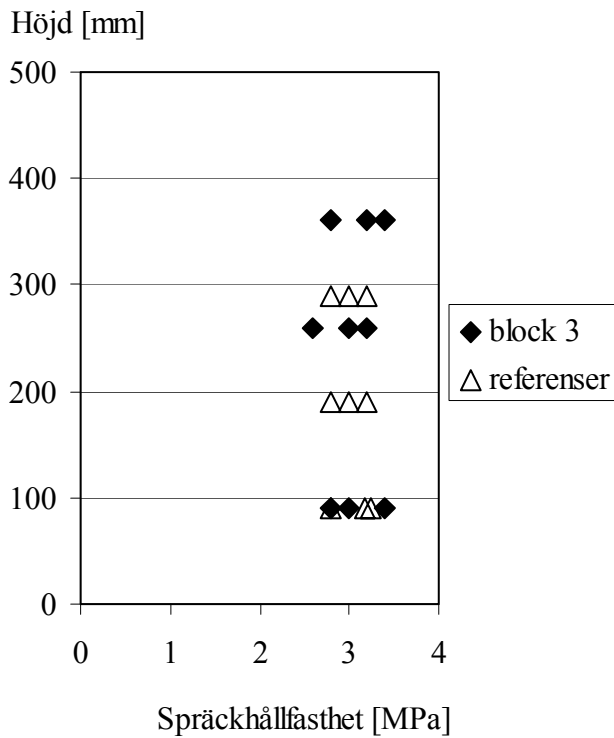
### 3.6 Spräckhållfasthet

Cylindrar borrar ur olika höjder för att karakterisera skadan hos betongen. Klyvningen av provkroppen visar att större global sprickplan bildas vid randen och nedre delen av provkropparna. Spräckprov togs från betongblock 3 vid första omgången av cylindrar som spräcktes. Proven visade att spridningen var stor, beroende i vilken riktning borrhämnarna hade borrats ur och var cylindern hade borrats ur. Cylindrar borrades i två riktningar, både horisontell (vinkelrät mot splitterbelastningen) och vertikalt (längs med splitterbelastningen). I Figur 3.14 visas resultat från de urborrade cylindrar, vilka var borrade horisontellt splitterbelastning och i Figur 3.15 redovisas resultat från de vertikalt borrade cylindrarna, samtliga från betongblock 3. För de vertikalt borrade cylindrarna påverkades inte spräckhållfastheten nämnvärt av splitterbelastningen. Men, för de horisontellt urborrade cylindrarna var spridningen stor. En trolig orsak är orientering av cylindern vid spräckprovning. Orientering av sprickan har betydelse för spräckhållfastheten, vilket illustreras i Figur 3.13. Om sprickan är vinkelrät belastningen, påverkas inte hållfastheten, men går sprickan längs med belastningsriktningen minskas hållfastheten vid spräckprovet.

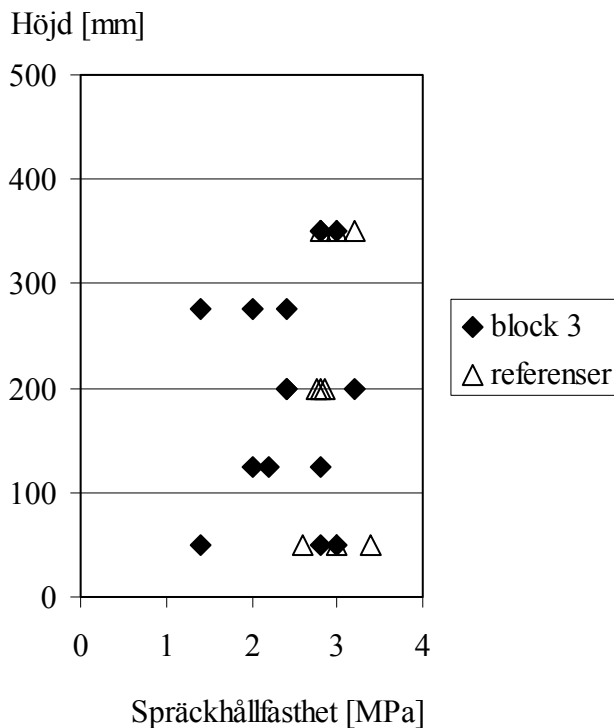


Figur 3.13 Orientering av sprickan vid belastning.

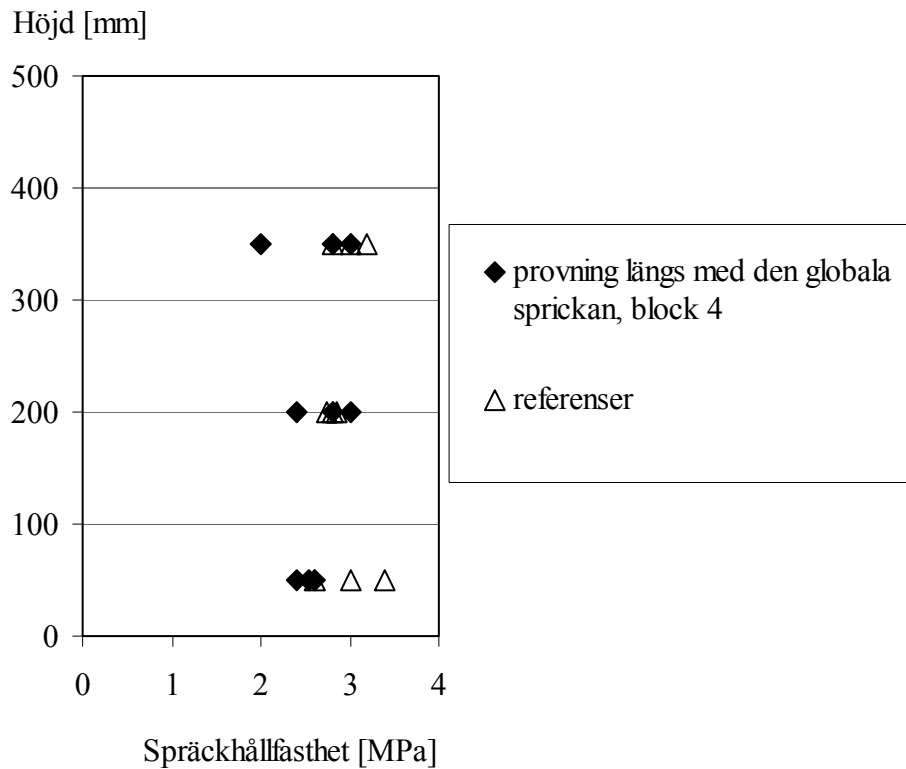
För att studera detta, togs flera borrhämnar ur från block 4 och block 6 där belastningsriktning markerades innan borrhämnar togs ur betongblocken. I Figur 3.16 och Figur 3.17 visas resultat från dessa spräckprov. De cylindrar vilka provades vinkelrät den globala sprickan hade högre hållfasthet jämfört med dem vilka provades längs den globala sprickan, medelvärde var 2.8 MPa, respektive 2.5 MPa. Dock var antalet provning få och spridningen stor.



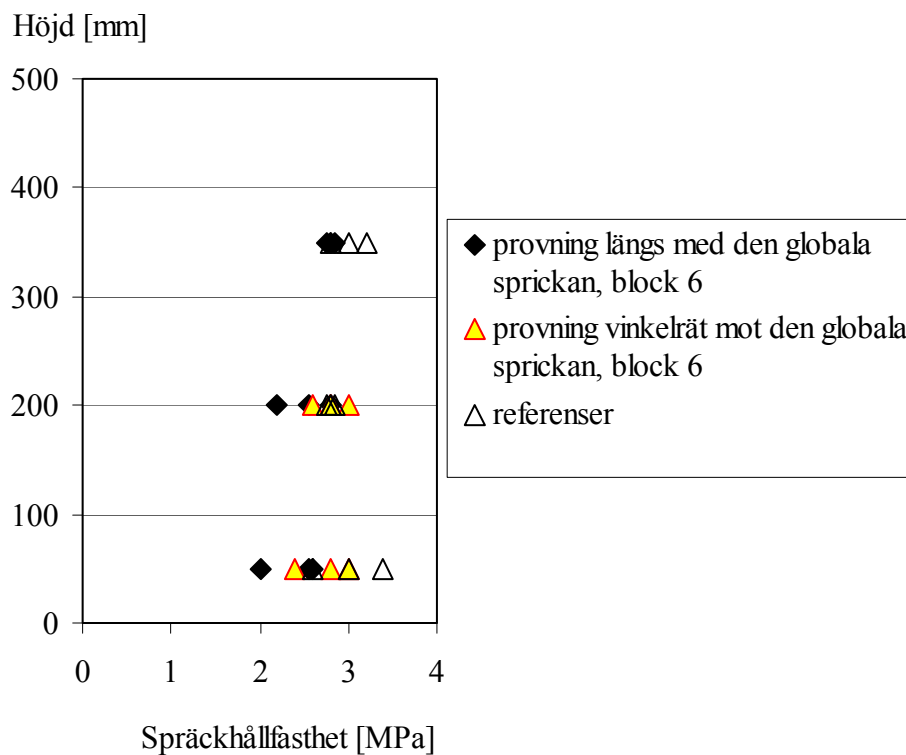
Figur 3.14 Spräckhållfasthet för vertikalt urborrade cylindrar, sprickans orientering okänd.



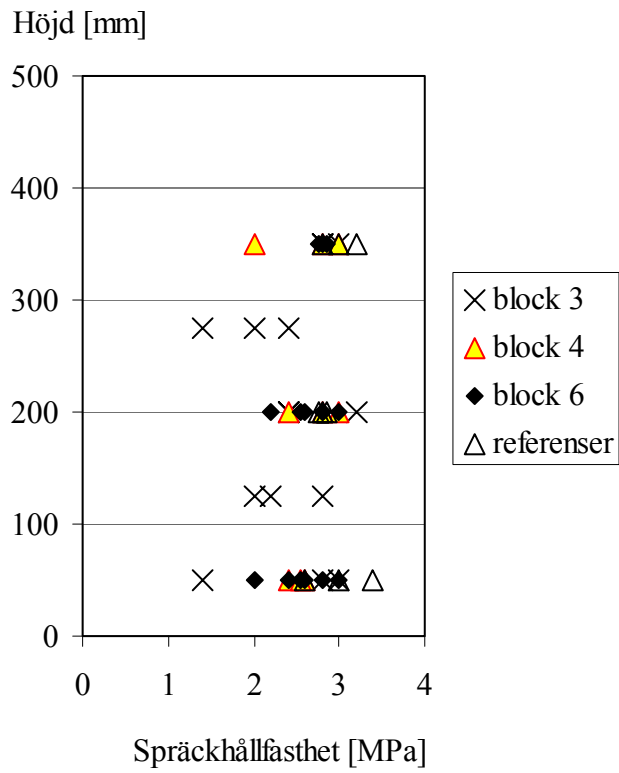
Figur 3.15 Spräckhållfasthet för horisontellt urborrade cylindrar, sprickans orientering okänd vid provning.



Figur 3.16 Spräckhållfasthet för horisontellt urborrade cylindrar, sprickans orientering känd vid provning.



Figur 3.17 Spräckhållfasthet för horisontellt urborrade cylindrar, sprickans orientering känd vid provning.



Figur 3.18 Spräckhållfasthet för samtliga horisontellt urborrade cylindrar.

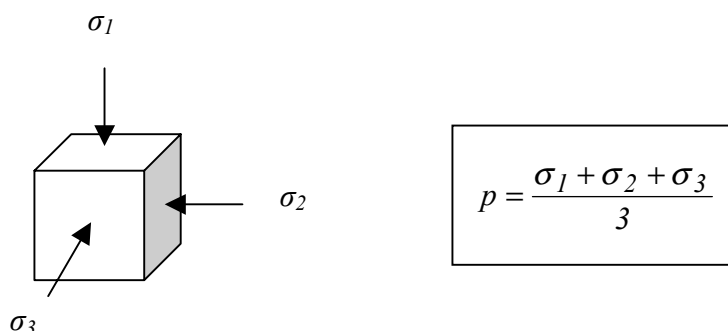
## 4 Numeriska analyser

För att studera splitterbelastning mot betong med numeriska metoder har AUTODYN nyttjats. Programmet är generellt verktyg, vilket är speciellt utvecklat för att studera icke-linjära dynamiska problem. Programmet nyttjar finit differens, finit volym och finit elementmetod. Den här typen av program benämns ofta som hydrokoder. Fenomen som kan analyseras med hydrokoder karakteriseras av starkt tidsberoende, gällande både geometriska icke-linjäriteter, såsom stora töjningar och deformationer, och icke-linjär material beskrivning, se vidare AUTODYN (2003). Programmets grundekvationer är Rankine-Hugoniot ekvationerna, bevarande av massa, rörelsemängd och energi. För att beskriva ett kontinuum behövs ytterligare två samband, vilka beskriver materialets uppförande: materialets tillståndsekvation (kapitel 4.1) och en konstitutiv modell (kapitel 4.2). Tillståndsekvationen kallas ofta för "EOS", vilket är förkortningen av engelska "Equation Of State".

Följande numeriska analyser har genomförts. I kapitel 4.3 analyseras splittersvärmen utan inverkan från den stötvåg som genereras av sprängladdningen (hexotol). I kapitel 4.4 analyseras enbart vilken inverkan stötvågen har på betongblocket. I kapitel 4.5 analyseras inverkan av kombinationen splitter- och stötvågsbelastning.

### 4.1 Tillståndsekvation för betong

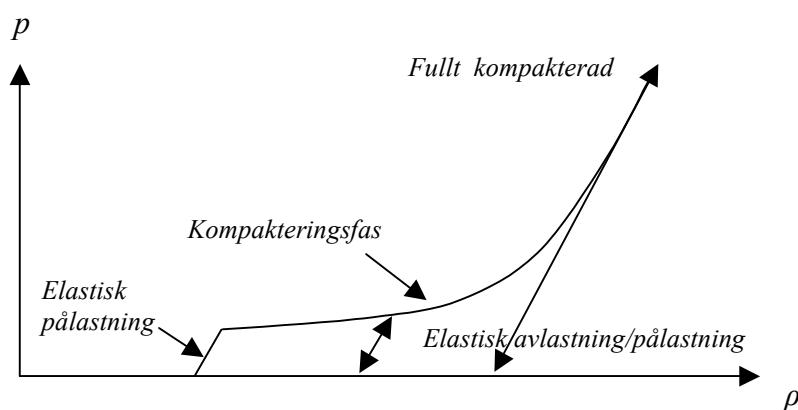
Något förenklat beskriver tillståndsekvationen sambandet mellan hydrostatisk tryck och volymändring eller densitetsändring. Hydrostatiskt tryck är medelspänningen då en kropp belastas med samma tryck (spänning) i alla riktningar, se Figur 4.1.



Figur 4.1 Definition av hydrostatisk tryck,  $p$ .

För ordinära finita element program beaktas normalt inte tillståndsekvationen direkt (densiteten är konstant under hela analysen). Materialuppförandet beskrivs med konstitutiva ekvationer utan en explicit beskrivning av materialets tillståndsekvation. Konstruktioner utsatta för "normalbelastning" uppstår inte så höga hydrostatiska tryck, där hydrostatisk kompaktering behövs beaktas. Därmed kan en korrekt materialbeskrivning fås utan specifik beskrivning av materialets tillståndsekvation (dock kan icke-linjärt uppförande även fås vid hydrostatisk belastning utan en tillståndsekvation genom att införa en begränsning för elastiska spänningar).

Tillståndsekvationen är viktig att beakta då materialet utsätts för höga hydrostatiska tryck, exempelvis vid explosionslaster, projektilinträning eller splittrinträngning. I AUTODYN anges materialets tillståndsekvation explicit och i Figur 4.2 visas hur den beaktas. Om betong utsätts för hydrostatiskt tryck kompakteras betongen (densiteten ökar). Vid elastisk pålastning är sambandet linjärt och när mikrosprickor uppstår blir tillståndsekvation icke-linjär. Under kompakteringsfasen krossas betongen successivt och porerna kollapsar. När betongen är fullt kompakterad och alla porerna är kollapsade blir tillståndsekvation linjär, vilket sker vid väldigt höga tryck. Eftersom inga triaxiella materialförsök har genomförts för experiment i denna rapport har standardvärden för betong nyttjats för att beskriva betongens tillståndsekvation, vilka återfinns i materialbiblioteket i AUTODYN, se Tabell 4.1 (densiteten är 28 dygns densitet från materialprover, se Appendix A).



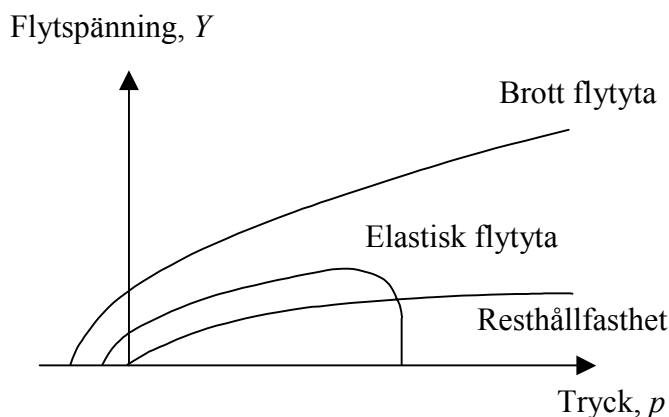
Figur 4.2 Tillståndsekvation för betong. Från AUTODYN (2003).

Tabell 4.1 Parametrar för tillståndsekvation för betong, från AUTODYN (2003).

Parameter	Value
Porous density ( $\text{g/cm}^3$ )	2225 (från materialprov, se Appendix A)
Porous soundspeed (m/s)	2920
Initial compaction pressure (kPa)	$2.33 \cdot 10^4$
Solid compaction pressure (kPa)	$6 \cdot 10^6$
Compaction exponent $n$	3
Solid EOS:	Polynomial
Compaction curve:	Standard
$A1$ (kPa)	$3.527 \cdot 10^7$
$A2$ (kPa)	$3.958 \cdot 10^7$
$A3$ (kPa)	$9.04 \cdot 10^6$
$B0$	1.22
$B1$	1.22
$T1$ (kPa)	$3.527 \cdot 10^7$
$T2$ (kPa)	0

## 4.2 Konstitutiv modell för betong

I AUTODYN finns en speciellt utvecklad modell för att analysera betong, RHT modellen. Modellen är utvecklad av Riedel, se Riedel (2000). Modellen består av tre flytytor, en elastisk yta, en brottyta, samt en yta som beskriver resthållfastheten, se Figur 4.3. I detta kapitel ges en kort beskrivning av modellen. För en mer detaljerad beskrivning, se Riedel (2000) eller AUTODYN (2003).



Figur 4.3 RHT modellen.

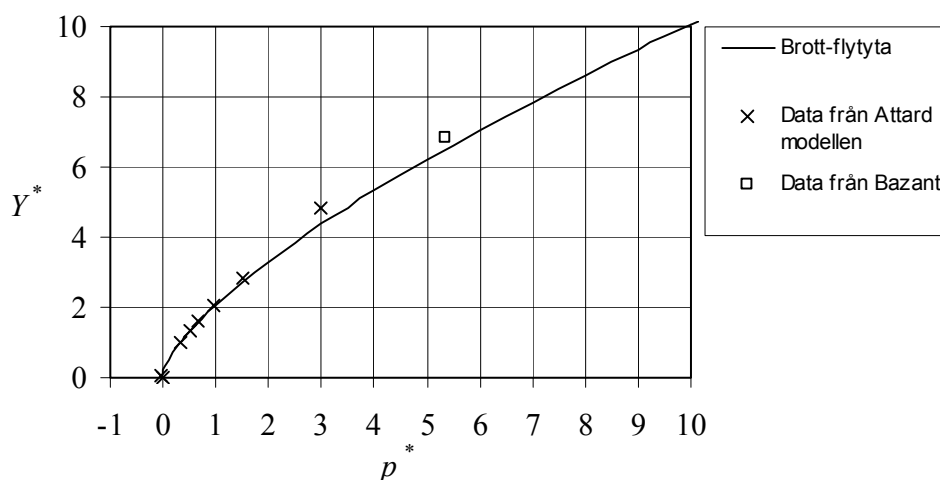
Vid belastning nås först den elastiska flytytan, därefter reduceras skjuvmodulen och hårdnandet är linjärt upp till maximal last. Själva brott-flytytan är töjningshastighetsberoende där tryck- och dragbelastning särskiljs åt. Brott-flytytan är dessutom känslig för varierande tryck. Vidare är den tre-invariant beroende innehållande en tryck- och dragmeridian, vilket innebär att modellen kan beakta varierande spänningsförhållande i olika riktningar. Exempelvis fångas både biaxiell och triaxiell belastningsfall upp ett adekvat sätt. Den nedåtgående grenen i RHT modellen beskrivs med en skademodell. Slutligen innehåller modellen en yta som beskriver resthållfastheten för betongen. Även resthållfastheten är känslig för varierande tryck.

I de numeriska analyserna i denna rapport har materialparametrar valts enligt metod från Leppänen (2002). Nedan beskrivs metoden kortfattat. För att bestämma brott-flytytan används en modell vilket är framtagen av Attard och Setunge (1996). Modellen har använts på betongbyggnad Chalmers, och den visar att den överensstämmer väl med experiment, se exempelvis Johansson (2003). Indata parametrar som används till Attard och Setunge är den enaxiella tryckhållfastheten och elasticitetsmodulen, vilka fås från standard cylinderprover, se appendix A. I Figur 4.4 visas punkter framtagna med Attards modell och indata till AUTODYN. I AUTODYN anges brott-flytan med två parametrar ( $A$  och  $N$ ), vilka har kurvanpassats till data från Attard-modellen. För att beakta töjningshastighetseffekten anges ytterligare två parametrar:  $\alpha$  för tryck och  $\delta$  för drag. Gällande parametern för töjningshastighetsberoende för tryck, stämmer den väl med försöksdata, se exempelvis Bischoff och Perry (1991). Dock är töjningshastighetsberoendet på dragsidan inte nöjaktigt i RHT modellen. Modellen överskattar draghållfastheten för låga töjningshastigheter och för höga töjningshastigheter underskattas draghållfastheten. Vidare beskrivs mjuknandet för drag med en linjärelastisk skademodell, vilket innebär att brottnenergin blir överskattad i modellen.

I Leppänen (2002) gjordes en parameterstudie gällande töjningshastighetsberoendet. Eftersom brottnenergin var aningen överskattad på grund av att modellen beskriver mjuknande linjärelastisk, varierades beroendet för töjningshastighet för drag. Parameterstudie visade vilken inverkan töjningshastighets beroende för drag har för betong vid projektilinträning. När en projektil tränger i betongen uppstår en mycket större krater än för splitterbelastning. Själva kraterstorleken för projektilinträning är

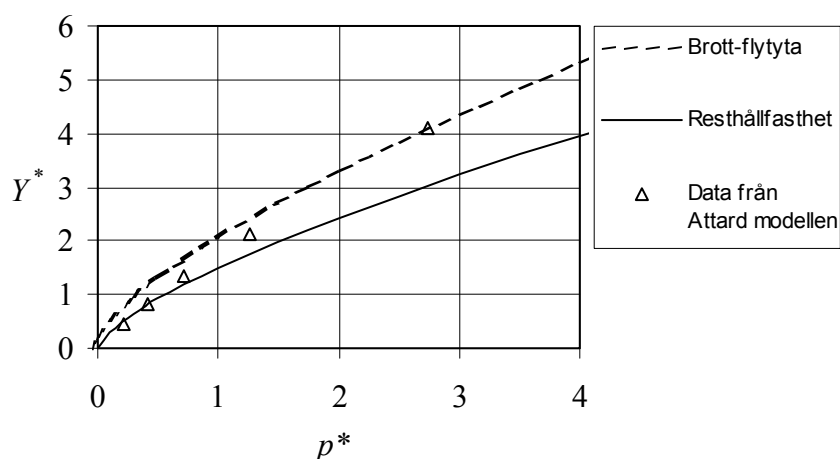


starkt beroende av draghållfastheten (töjningshastighets beroende i drag). För splitterbelastning är dock draghållfastheten av mindre betydelse i ytskiktet, där betongen istället krossas. För splitter och stötvågsbelastning är draghållfastheten av betydelse vid ränder där reflektioner av stötvågen ger upphov till en dragvåg och risk för utstötning eller uppsprickning finns.



Figur 4.4 Brott - flytyta. Tryck och flytspänning är normaliserade mot tryckhållfasthet.

Med Attards modell fås även resthållfastheten för betong för statisk belastning. Några försök med dynamisk belastning gällande resthållfasthet återfinns inte i litteraturen, varav Attards modell har valts att använda vid bestämning av resthållfastheten, vilken bestäms med två parametrar ( $B$  och  $M$ ) i AUTODYN, se Tabell 4.2.



Figur 4.5 Resthållfasthet för betong. Tryck och flytspänning är normaliserade mot tryckhållfasthet.

Skjuvmodulen beräknas utifrån elasticitetsmodulen och draghållfastheten beräknas utifrån tryckhållfastheten, enligt CEB-FIB Model Code 1990 (1993).

Tabell 4.2 Parametrar för RHT-modellen.

Parametrar (på engelska)	Värde	Kommentarer
Shear Modulus (kPa)	$8,625 \cdot 10^7$	a
Compressive Strength $f_c$ (MPa)	$31.2 \cdot 10^3$	b
Tensile Strength $f_t/f_c$	0.091	c
Shear Strength $f_s/f_c$	0.18	Standard värde
Failure Surface Parameter $A$	2	d
Failure Surface Parameter $N$	0.7	d
Tens./Compr. Meridian Ration	0.6805	Standard värde
Brittle to Ductile Transit.	0.0105	Standard värde
G(elas.)/G(elas-plas.)	2	Standard värde
Elastic Strength/ $f_t$	0.7	Standard värde
Elastic Strength/ $f_c$	0.53	Standard värde
Use Cap on Elastic Surface	Yes	Standard värde
Residual Strength Const. $B$	1.5	d
Residual Strength Exp. $M$	0.7	d
Comp. Strain Rate Exp. $\alpha$	0.032	Standard värde
Tens. Strain Rate Exp. $\delta$	0.025	e
Max. Fracture Strength Ratio	$1 \cdot 10^{20}$	Standard värde
Damage constant $DI$	0.04	Standard värde
Min. Strain to Failure	0.01	Standard värde
Residual Shear Modulus Frac.	0.13	Standard värde
Tensile Failure model	Hydro Tens.	Standard värde
Erosion Strain/instantaneous geometric strain (Lagrange)	1.4	e

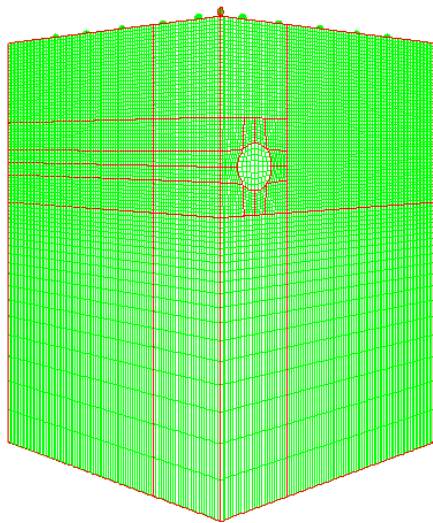
- a. Beräknat enligt CEB-FIB Model Code 1990 (1993) från E-modul, se Appendix A.  
 b. 28 dygns medelvärde för cylinderhållfasthet, se Appendix A.  
 c. Beräknat enligt CEB-FIB Model Code 1990 (1993).  
 d. Framtagen enligt modell från Attard och Setunge (1996).  
 e. Kalibrerade värden enligt Leppänen (2002).

### 4.3 Splitterbelastning utan inverkan av stötvåg

För att studera splitterbelastning där inverkan av stötvågen ej har beaktats har en fjärdedels modell nyttjats för att beskriva betongblocket, se Figur 4.6. I modellen förberedes en cylinder, vilket kunde belastas enaxiellt efter splitterbelastning (för att simulera de tryckprov som redovisas i kapitel 3.5). Dock, har försöken visat att hållfastheten inte påverkas nämnvärt under splitterbelastningen, och dessa analyser har därmed ej genomförts. Analyser har dock påbörjats innan resultat från provningarna var färdiga, varav denna komplicerade modell har nyttjats. En fin elementindelning har nyttjats där splittret träffar betongblocket, och med djupet ökar elementstorleken. Totalt 597 654 element har använts för betongblocket.

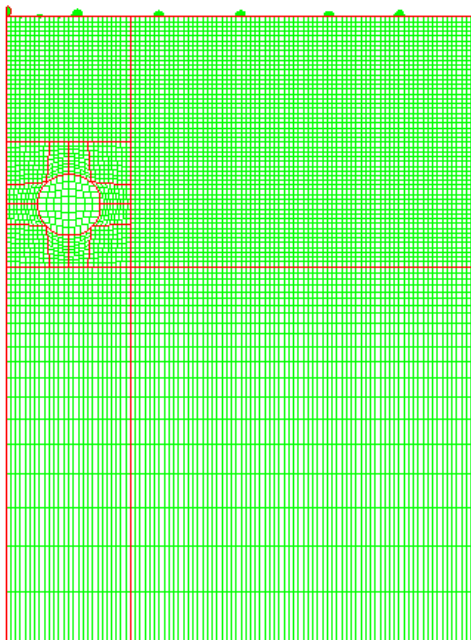
Här har provkropp 3 har analyserats, där splitterfördelningen är vald enligt Figur 3.2. Totalt har tre analyser genomförts med enbart splitterbelastning. Först, för att studera vilken effekt randvillkor har på analysen var noderna fria i första analysen (tillåter reflektion av spänningsvåg som alstras av splitter), och i andra låstes noderna i botten av betongblocket. Dessa två analyser hade en anslagshastighet på 1 800 m/s. Den tredje analysen hade en anslagshastighet på 1 650 m/s, där noderna var låsta i botten av betongblocket.

För splitterkulorna nyttjades en perfekt elasto-plastisk material modell (von Mises), vilka har modellerats som sfärer där infallsvinkeln är noll för samtliga splitterkulor. I försöken varierade infallsvinkeln där vinkeln ökade närmare kanterna av betongblocket. Kompressionsmodulen (Bulk Modulus) är 140 GPa och skjuvmodulen (Shear Modulus) är 80 GPa i analysen. Flytspänningen är i analysen 2 500 MPa för splitterkulorna. För att undvika numeriska problem har erosion nyttjats för splittret, där erosionskriteriet är 1 (100%) ekvivalent plastisk töjning.

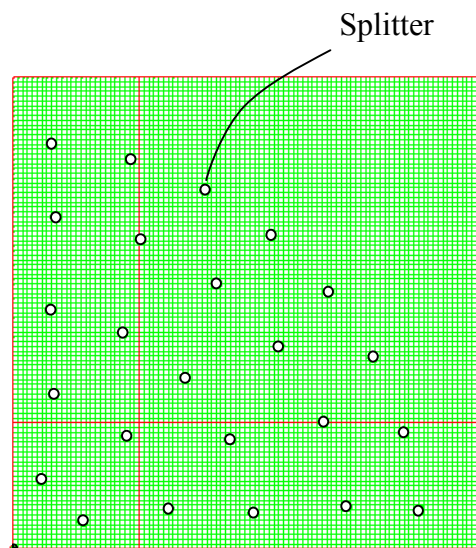


Perspektiv 1/4 block

Tvärsnitt (halva blocket)



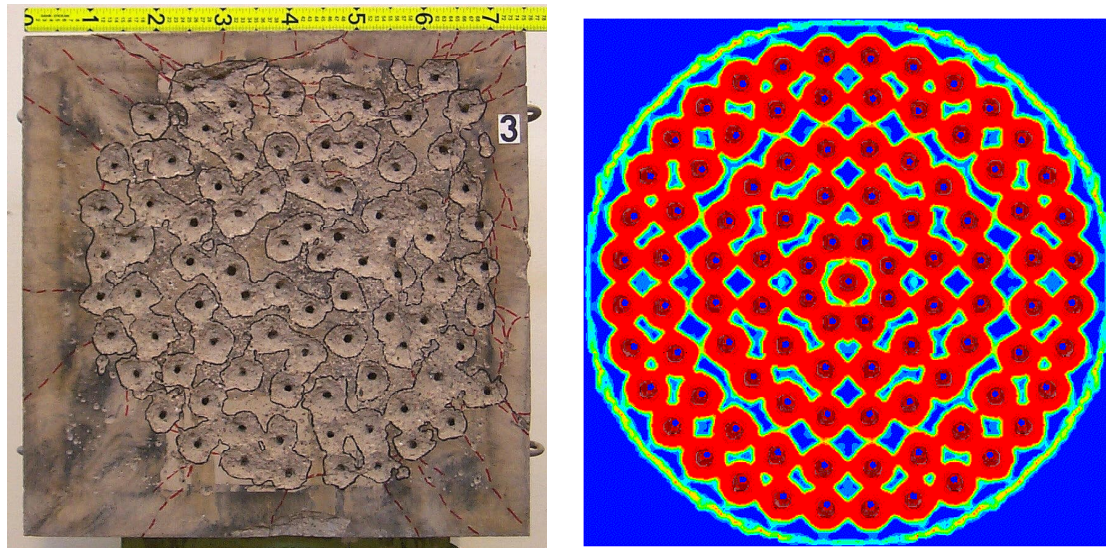
Plan (1/4 block ovanifrån)



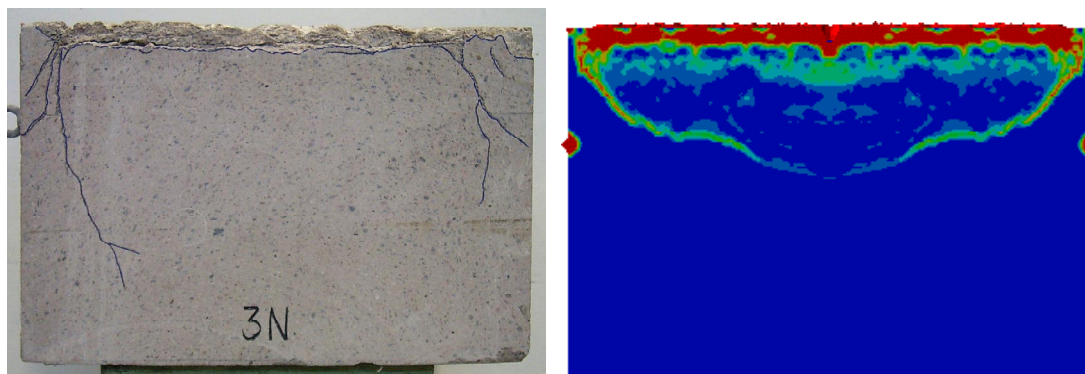
Figur 4.6 Numerisk modell för analyser med splitterbelastning.

I Figur 4.7 och Figur 4.8 visas jämförelse mellan resultat från analysen och med experiment. I dessa analyser var anslagshastigheten 1 800 m/s och botten av betongblocket fixerad (låsta noder). Från analysen kan det observeras att kratrarna sammanfaller med varandra, vilket var även fallet i försöken. Tvärsnitt från försök och analys i Figur 4.8 visar att i försöken var den globala sprickan betydligt brantare än vid analysen. Dock, var hastigheten i experimenten något lägre än vid analys, samt är inte stötvågen från laddningen beaktad. Jämförelse mellan experiment och analys där botten av betongblocket har fria noder (reflektion av den spänningsvåg som

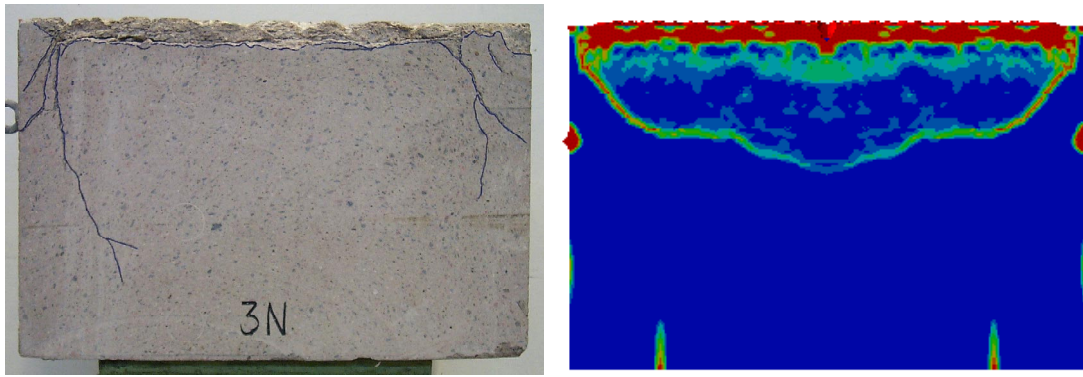
generas av splitteranslaget tillåts) visas i Figur 4.9. Resultatet från denna analys ger liknande uppsprickning som analysen med låsta noder i botten, med undantag av några få sprickor vid botten av betongblocket. Skadegraden i Figur 4.7, Figur 4.8 och Figur 4.9 är mellan noll och ett.



Figur 4.7 Jämförelse mellan experiment och analys, träffyta. Stötvåg ej beaktad och splitterhastighet 1 800 m/s. Randvillkor: botten är fixerad.

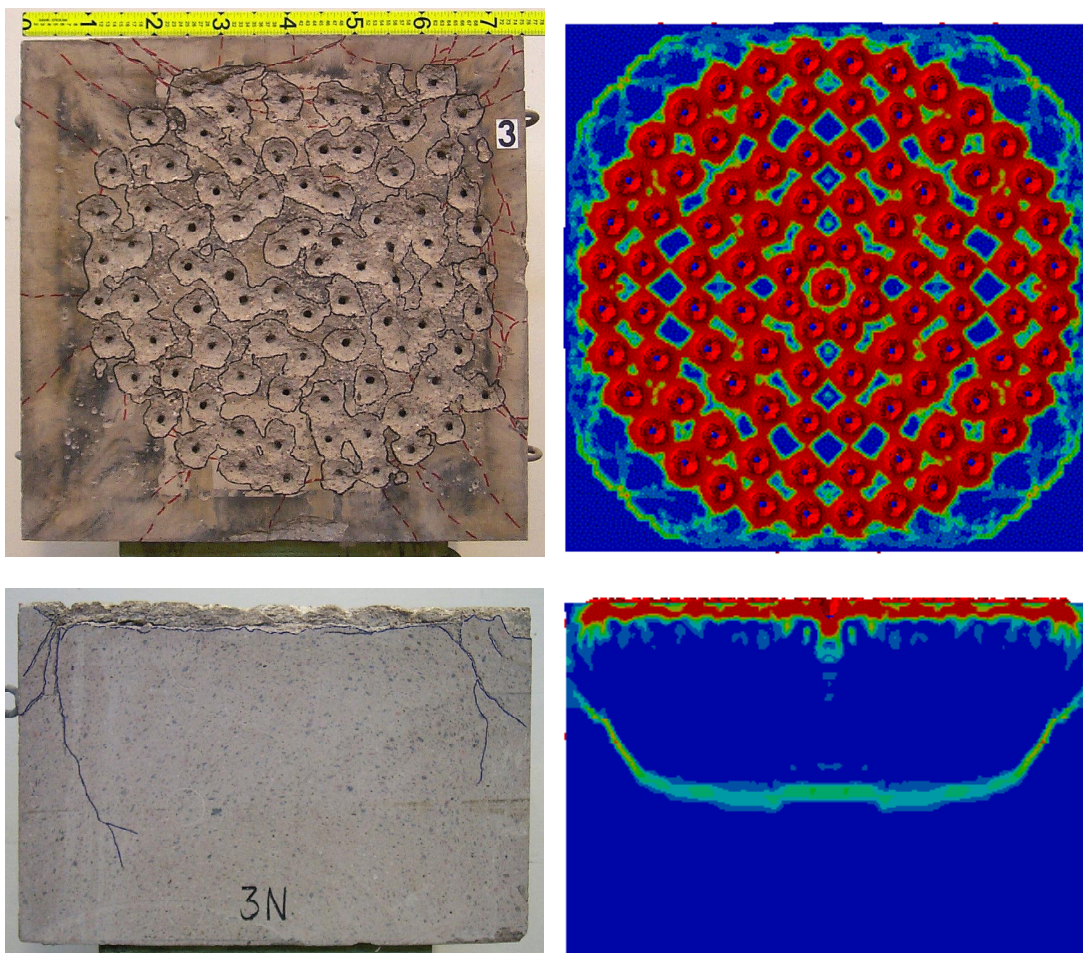


Figur 4.8 Jämförelse mellan experiment och analys, tvärsnitt. Stötvåg ej beaktad och splitterhastighet 1 800 m/s. Randvillkor: botten är fixerad.



Figur 4.9 Jämförelse mellan experiment och analys, tvärsnitt. Stötvåg ej beaktad och splitterhastighet 1 800 m/s. Randvillkor: botten är fri.

För analys där splitterhastigheten är 1 650 m/s minskar skadan i betongen, se Figur 4.10. Dock, kommer den globala sprickan längre ned och med en brantare lutning än för analys med splitterhastighet på 1 800 m/s. Dock är skadegraden i den globala sprickan inuti betongkroppen betydligt lägre än analysen med den högre splitterhastigheten.

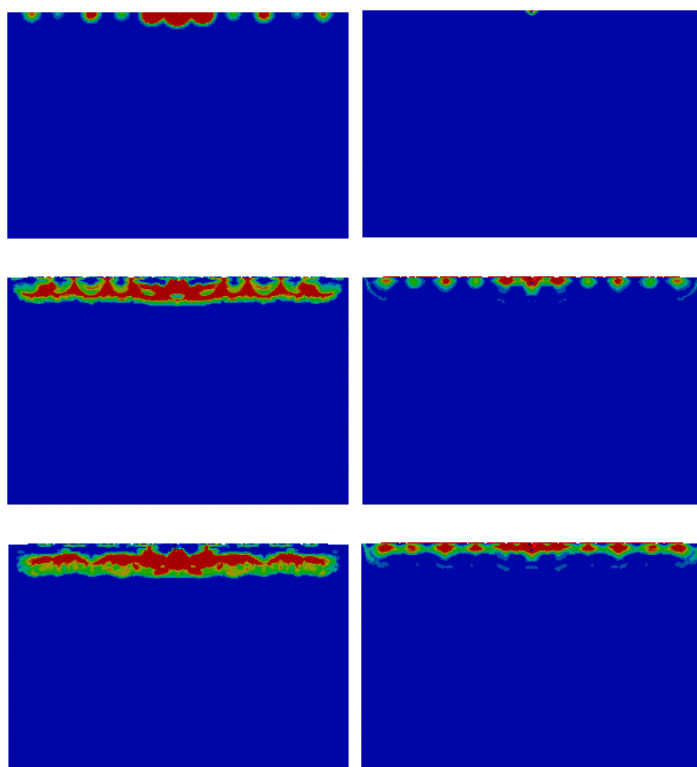


Figur 4.10 Jämförelse mellan experiment och analys, tvärsnitt. Stötvåg ej beaktad och splitterhastighet 1 650 m/s. Randvillkor: botten är fixerad.

När stötvågen (från splitteranslaget) passerar och träffar ränderna av blocket kommer den att reflekteras och en dragvåg skapas vid fria ränder. För att följa stötvågsutbredningen visas tryckvågen och skadegraden i Figur 4.11 och Figur 4.12. Trycket ("pressure") har begränsat till värden mellan 0 och 30 MPa. Skadegraden i figurerna är från ingen skada till full skada. I Figur 4.11 visas enbart tryckvåg och skadegrad, eftersom tryckvågen inte har nått randen vid betongblocket och dragspänningar inte har kunnat uppstå. Analyserna visar att skada har en förskjutning i tid förhållande till tryckvågen. I Figur 4.12 visas förutom tryckvågens och skadans utbredning även dragspänningar i tvärled. Från analysen går det att se att skadan som uppstår vid randen är en effekt av att tryckvågen har reflekterat och dragvågen som skapats orsakar skada i betongblocket. I dessa analyser var splitterhastigheten 1 800 m/s.

Tryck (0 – 30 MPa)

Skadegrad (0 – 1)

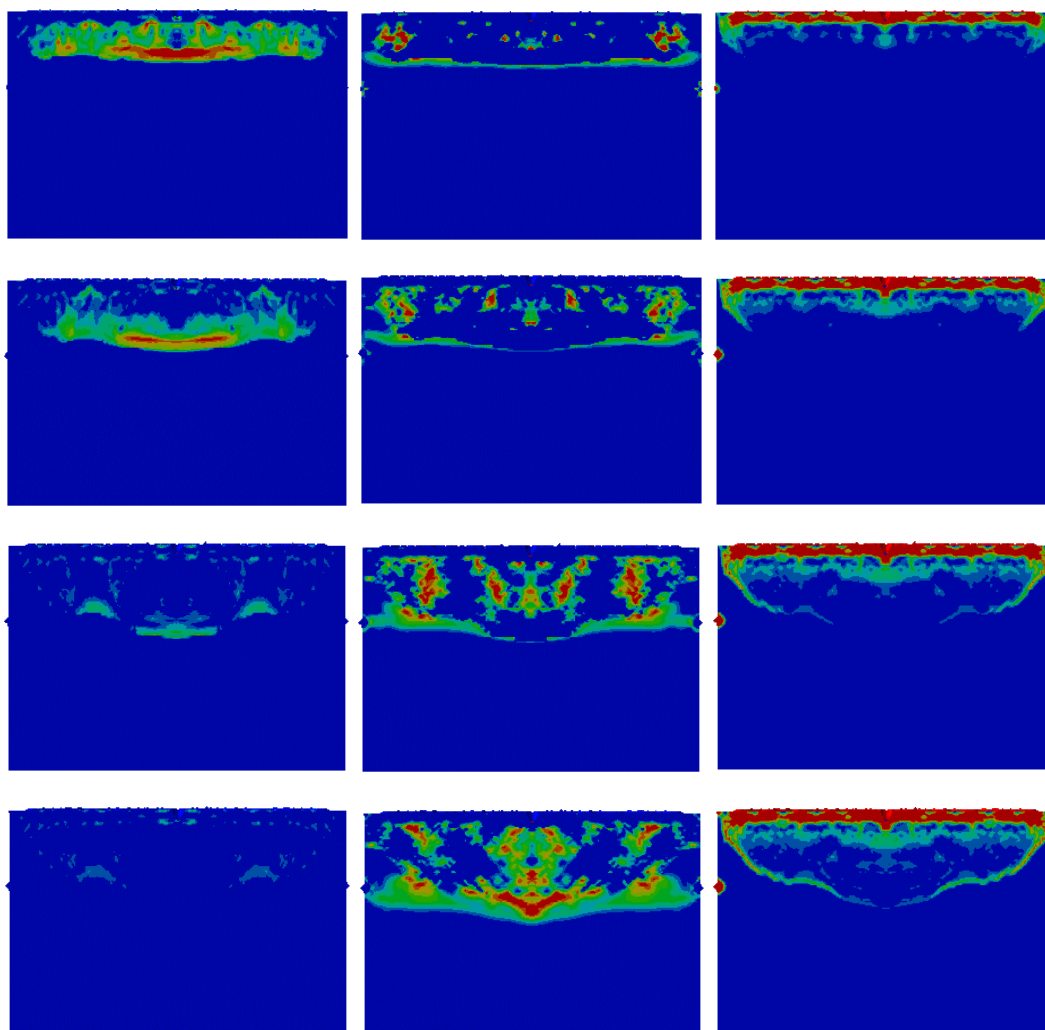


Figur 4.11 Tryckvågens och skadans utbredning.

Tryck (0 – 30 MPa)

Drag (0 – 3 Mpa)

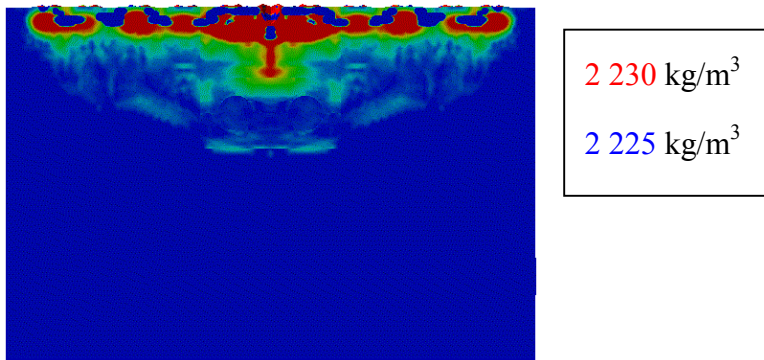
Skadegrad (0 – 1)



Figur 4.12 Tryckvågens, dragspänningarnas och skadans utbredning.

Numeriska analyser visar att densiteten ökar under splitterbelastningen. Dock är denna densitetshöjning marginell i analysen. Densiteten mättes för de urborrade cylindrar, dock är noggrannheten vid mätning av densitet så grov att en jämförelse med analysen inte är relevant. Dock, visar analysen i Figur 4.13 att en viss kompaktering sker vid splitteranslaget och det kan förklara den något ökade hållfastheten för de tryckprov som redovisas i kapitel 3.6.

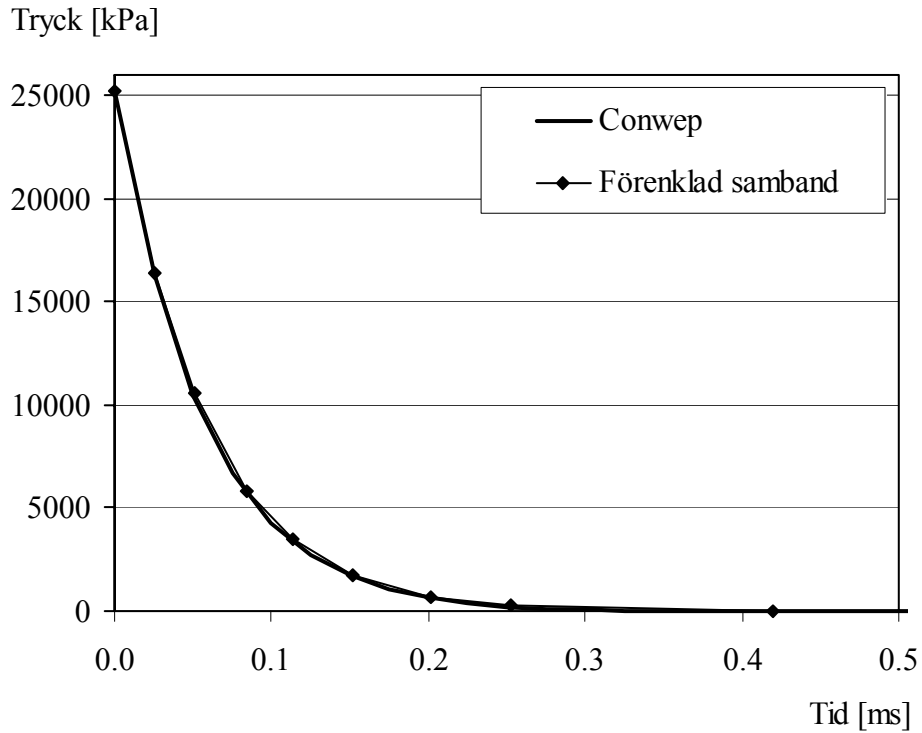




Figur 4.13 Densitetsökning under splitterbelastning.

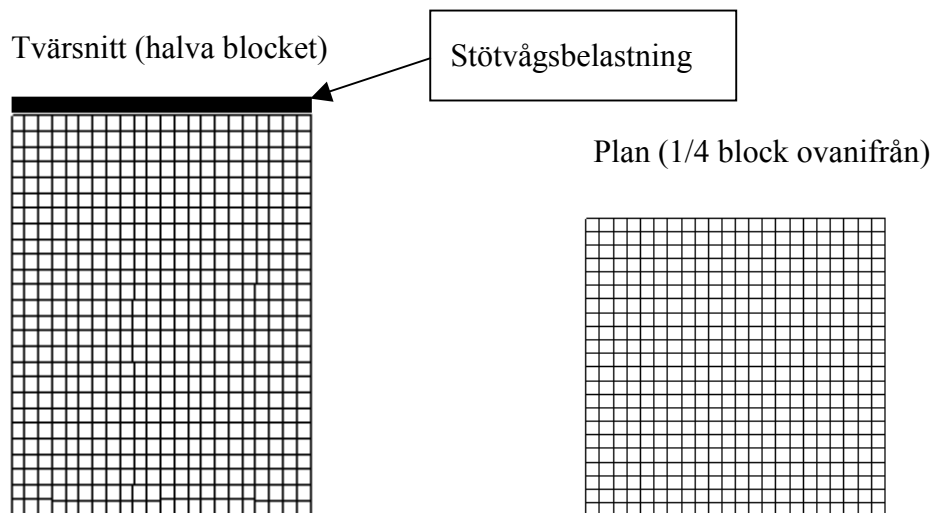
#### 4.4 Inverkan av enbart stötvågsbelastning

För att studera vilken effekt enbart stötvågsbelastningen har på betongblocket har analyser genomförts där tryck- och tidssambandet beräknats enligt ConWep (1992), sambandet visas i Figur 4.14. Vid splitterbelastningen nyttjades en laddning på 1,3 kg hexotol (Comp B) för betongblock 3, där hexotol har en ekvivalent tryck TNT på 1,359. I den numeriska analysen applicerades lasten som ett tryck på ytan som stegvis minskade från 25,26 MPa till 0. Höjden som laddningen (laddning nr. 4) detonerade på var 0,6 m och tiden för att stötvågen att nå betongblocket är beräknat till 0,1955 ms med ConWep, dock har trycket applicerats vid tidpunkt noll i analysen. Varaktigheten för stötvågen är ca 0,42 ms.



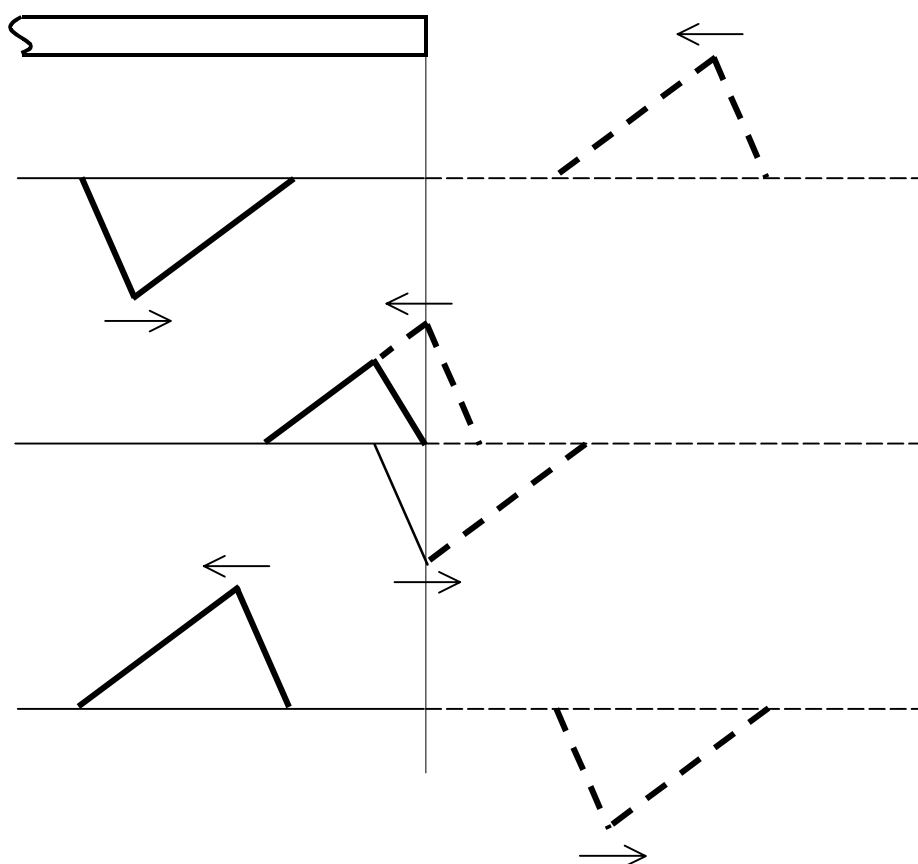
Figur 4.14 Stötvåg från Conwep och förenklad samband som nyttjats i analyser.

För stötvågsanalyser har en modell med större elementstorlek nyttjats, där antalet element är 22 x 22 x 26 element (totalt 12 584 element), modellen visas i Figur 4.15. Stötvågsbelastningen appliceras på ytan.



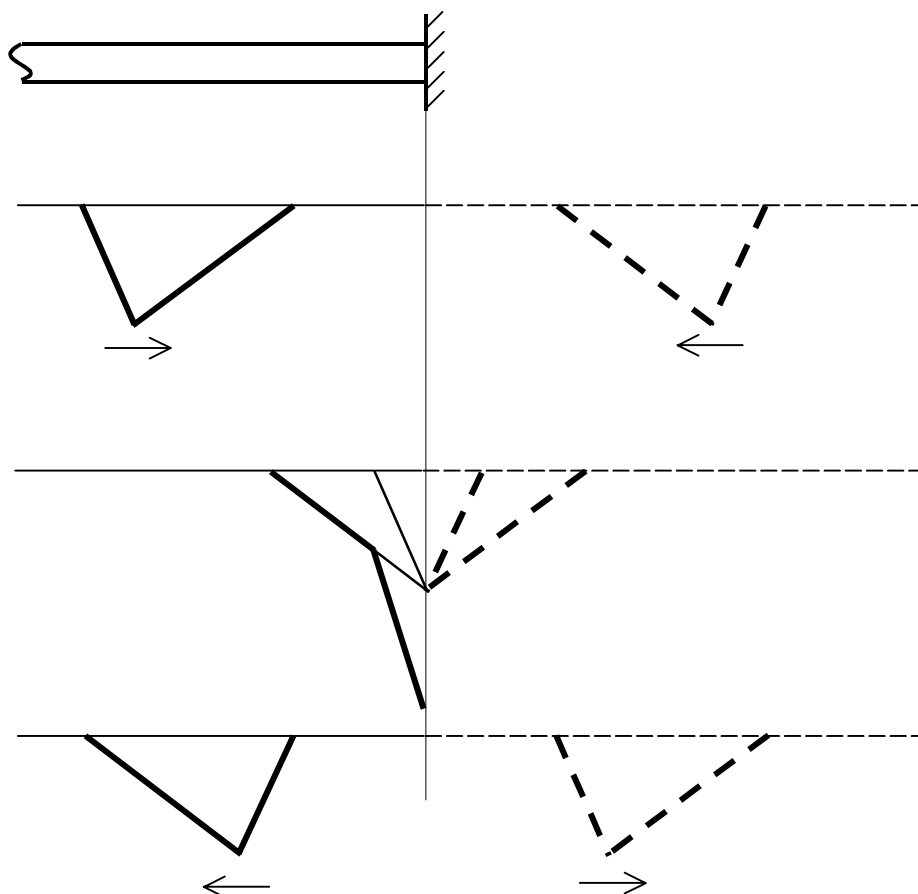
Figur 4.15 Numerisk modell för stötvågsanalyser.

Betongblocket var vid splitterbelastningen placerat på ett betongfundament. För att få en riktig beskrivning av randvillkoren i analyserna har olika randvillkor jämförts med varandra. Enligt Lundberg (1978) kommer en infallande tryckvåg, t ex orsakad av en stöt, att reflekteras olika beroende på vilket randvillkor det är. I Figur 4.16 och Figur 4.17 visas en schematisk framställning av hur vågen reflekteras vid en fri och en fix rand för en endimensionell stång för elastiska material. Vid fallet fri rand och med randvillkoret att spänningen är noll vid randen kan det visas att spänningen i stången ändrar tecken och amplituden är densamma efter reflektionen vid randen. Ifall vågen är en infallande tryckvåg ger den upphov till en reflekterande dragvåg med samma amplitud, se Figur 4.16.



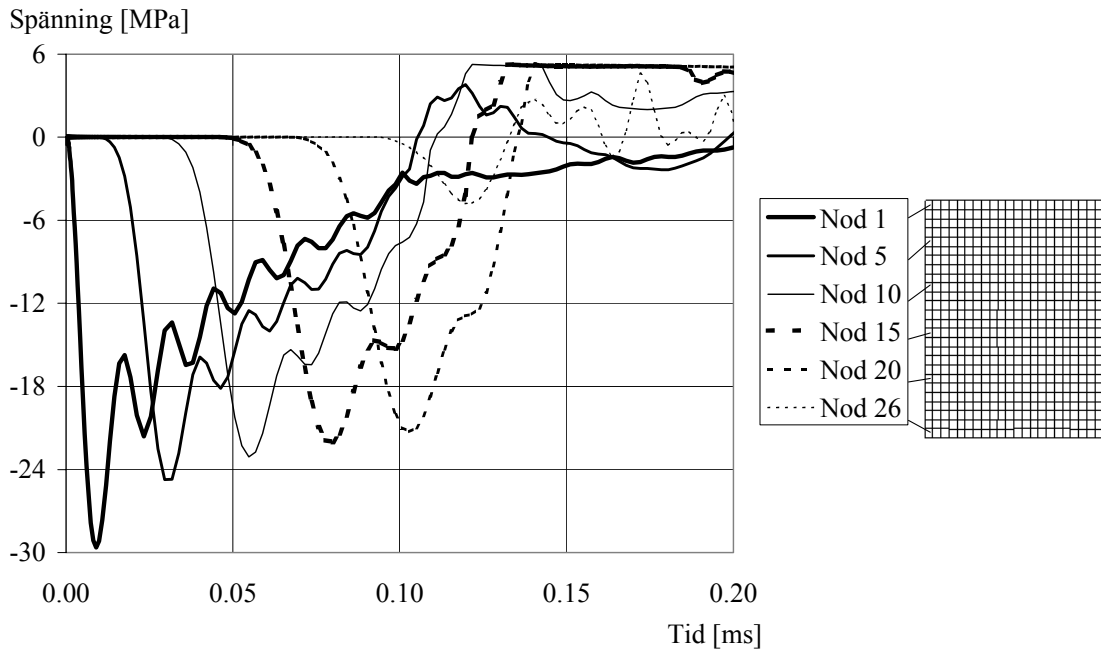
Figur 4.16 Reflektion av stötvåg vid fri rand. Avritad från Lundberg (1978).

I fallet vid fix rand med randvillkoret att hastigheten är noll vid randen kan det visas att spänningen fördubblas vid randen med bibehållet tecken vid reflektion. I fall den infallande stötvågen är en tryckvåg ger den upphov till en tryckvåg med dubbla amplituden vid randen, se Figur 4.17.

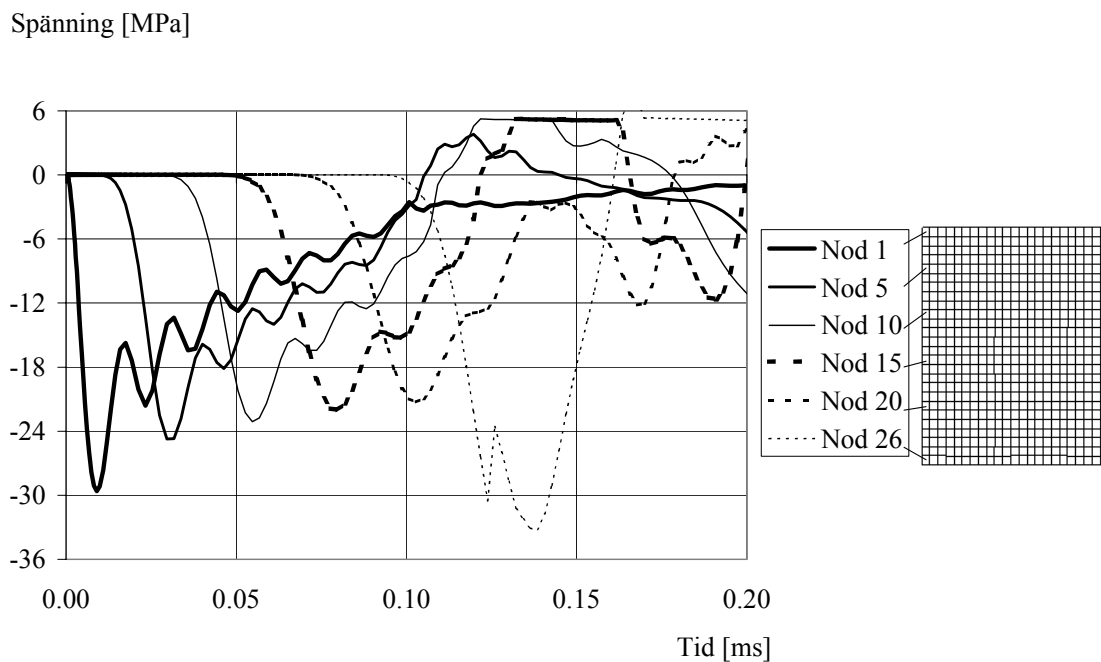


Figur 4.17 Reflektion av stötvåg vid fix rand. Avritad från Lundberg (1978).

Figur 4.16 och Figur 4.17 visar hur vågen reflekteras för elastiska material. I numeriska analyser minskar dock amplituden (det maximala trycket) med djupet. Dock, ökar varaktigheten för de högre trycknivåerna. I Figur 4.18 visas hur spänningen varierar för olika höjder för analys med fri rand och i Figur 4.19 för fix rand. I analys med fri rand är spänningen vid randen nära noll och för analys med fix rand ökar trycket avsevärt.



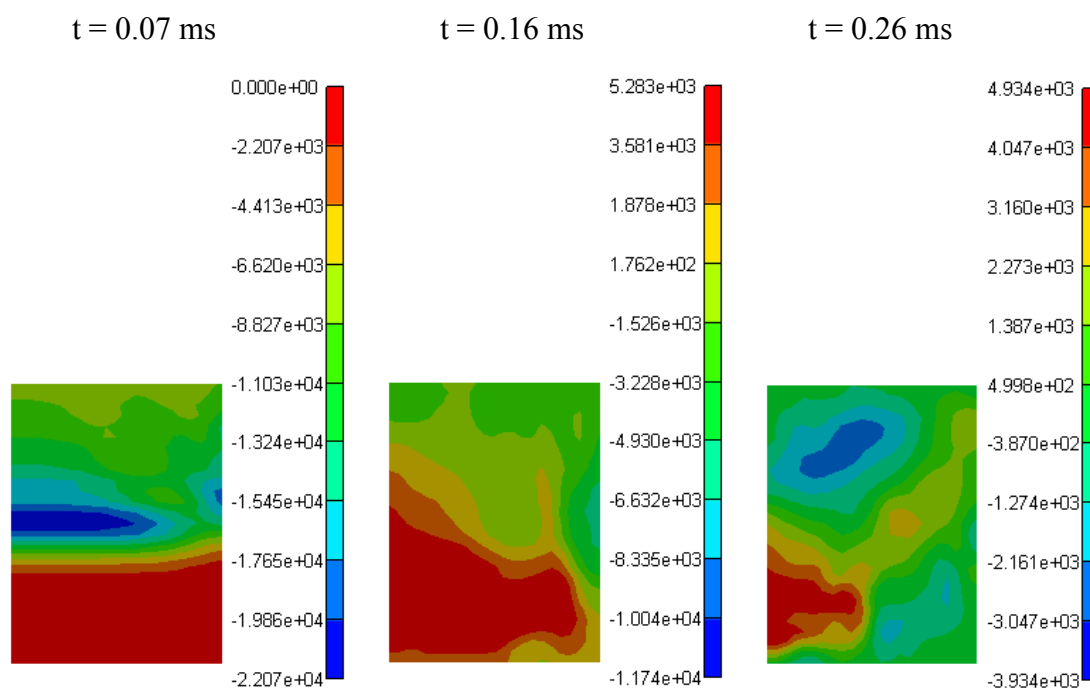
Figur 4.18 Spänningsvariation med djupet orsakad av stötvågsbelastning, fri rand.



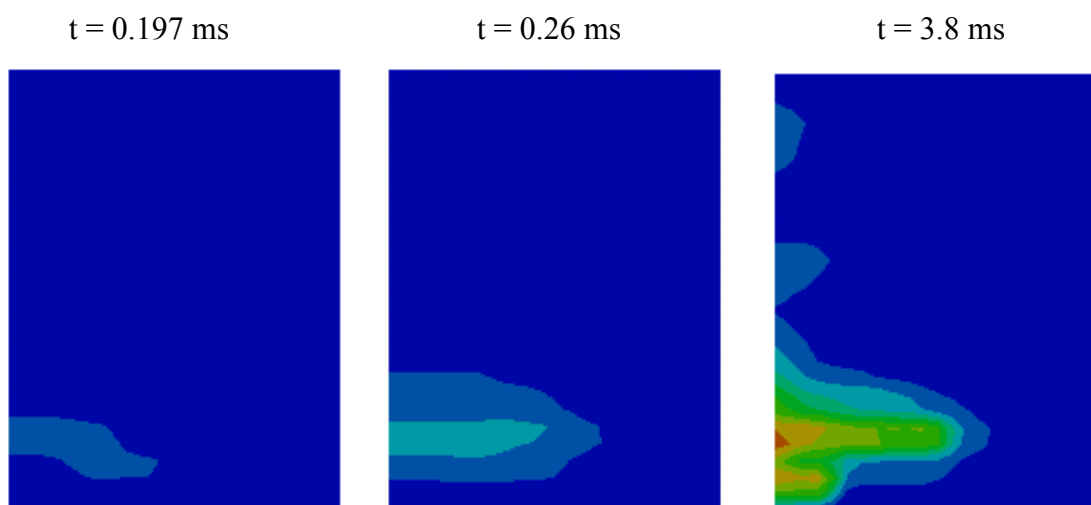
Figur 4.19 Spänningsvariation med djupet orsakad av stötvågsbelastning, fix rand.

Ett problem med att nyttja fria respektive fixa ränder i numeriska analyser är att energin bevaras i systemet. I verkligheten när tryckvågen når botten av betongblocket försvinner mycket av energin till underliggande material (dock reflekteras en del av vågen tillbaka till betongblocket). Detta innebär att i numeriska analyser kommer att skadan i betongen överskattas eftersom vågen kan reflektera upprepa gånger vid ränderna. När en tryckvåg kan fritt reflektera skapas en dragvåg vid ränderna som orsakar skada på betongen. Vertikala spänningar i olika tidpunkter från en analys med stötvågsbelastning och fria ränder visas i Figur 4.20. I Figur 4.21 visas skadan i

betongblocket för olika tidpunkter för samma analys. När vågen kommer infallande mot botten av betongblocket orsakas den ingen skada (tidpunkt 0.07 ms). Tiden för tryckvågen att nå till botten av betongblocket är ca 0.13 ms, och när tryckvågen har reflekterat ger den upphov till en dragvåg och stora dragspänningar uppstår i underkant och betongen blir skadad i detta område. Dock, ökar denna skada med tiden eftersom stötvågen kan fritt reflektera upprepade gånger vid ränderna (energin bevaras i systemet), tills amplituden är så pass låg att ytterligare skada inte kan uppstå i materialet.

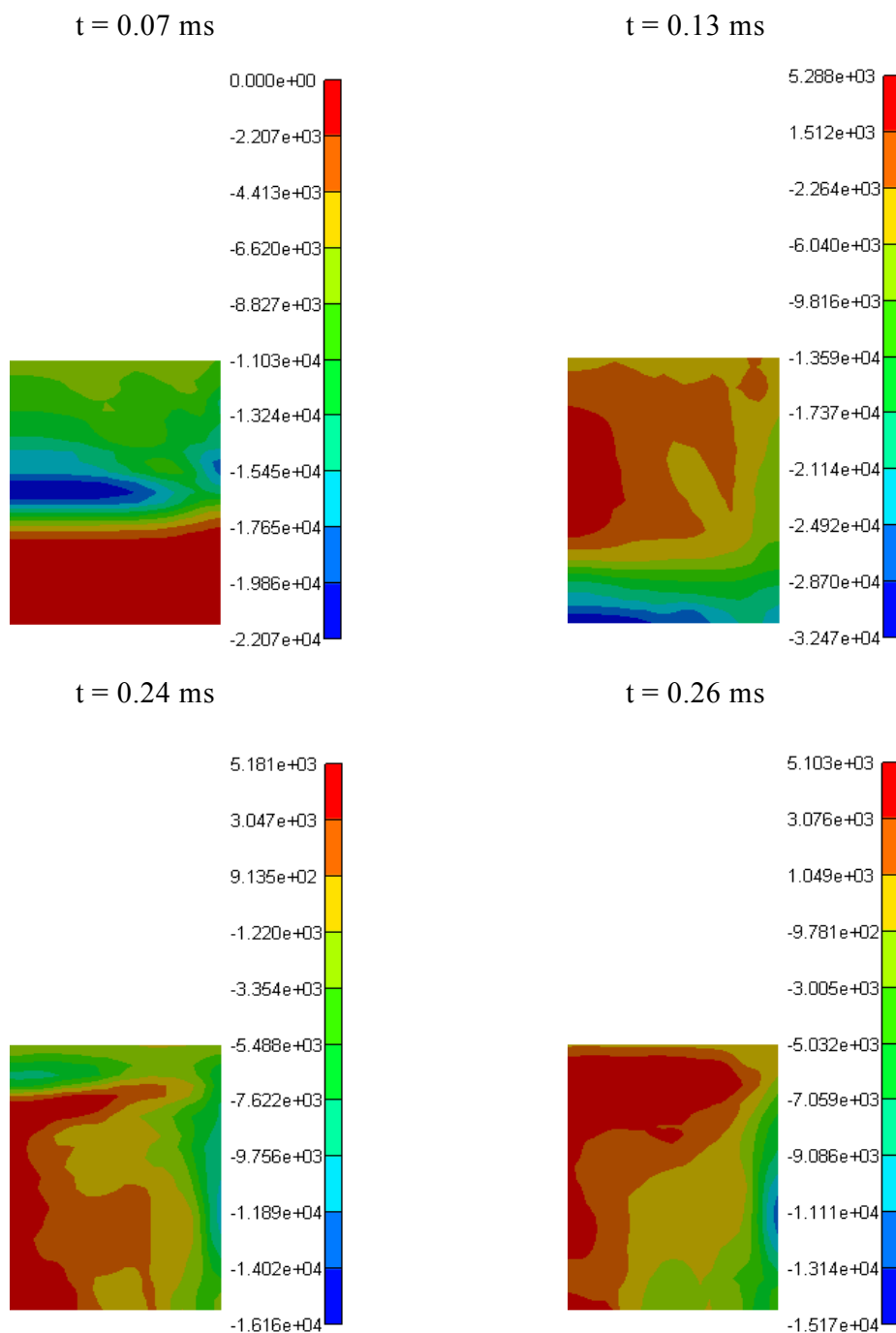


Figur 4.20 Spänning i vertikal led för olika tidpunkter, fri rand. Skalan vilken anger spänningsnivån varierar för de olika tidpunkterna.

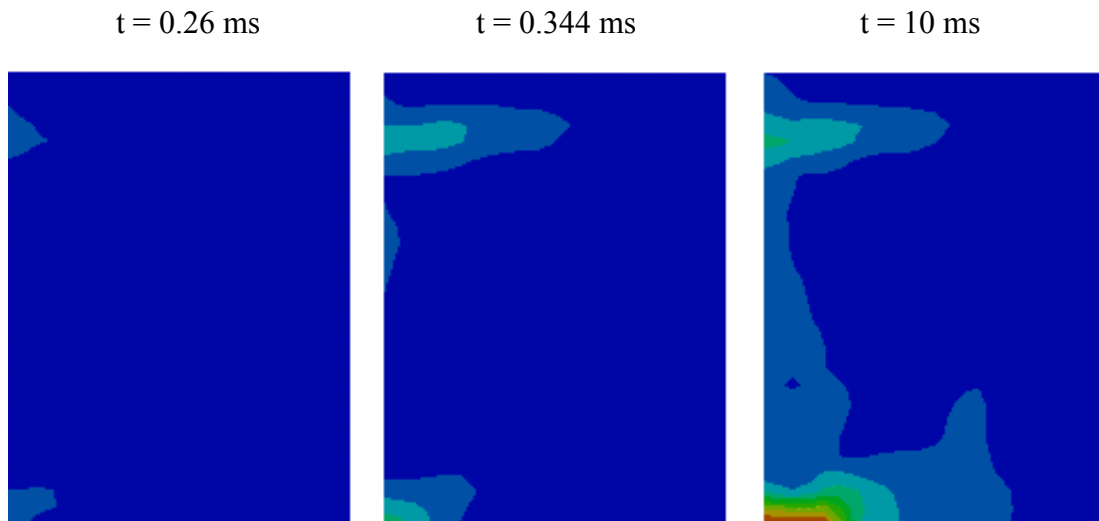


Figur 4.21 Skadegrad från 0 till 1 i betongen för olika tidpunkter, fri rand.

Vid fallet fix rand blir spänningarna identiska fram tills att tryckvågen (orsakad av stötvågsbelastningen) har nått botten av betongblocket. I Figur 4.22 visas vertikala spänningar för varierande tidpunkter och i Figur 4.23 visas skadan i betongen. När tryckvågen når botten av betongblocket blir den reflekterade vågen i form av en tryckvåg och vid randen fördubblas amplituden. Betongblocket tenderar att lyfta, men eftersom randvillkoret inte tillåter någon rörelse i vertikal riktning förhindras betongblocket att lyfta från marken. Detta orsakar dragspänningar i betongen. När den reflekterade tryckvågen åter reflekteras i toppen av blocket, skapas en dragvåg vilket orsakar skada i blockets ovkant.



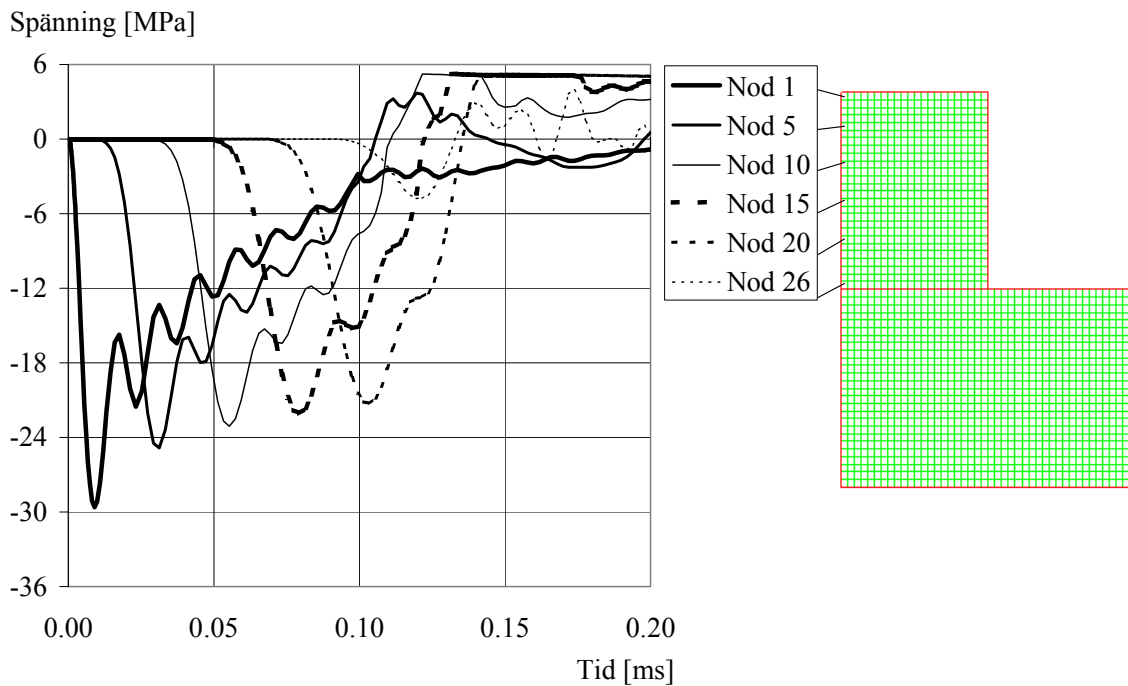
Figur 4.22 Spänning i vertikal led för varierande tidpunkter, fix rand. Skalan vilken anger spänningsnivån varierar för olika tidpunkterna.



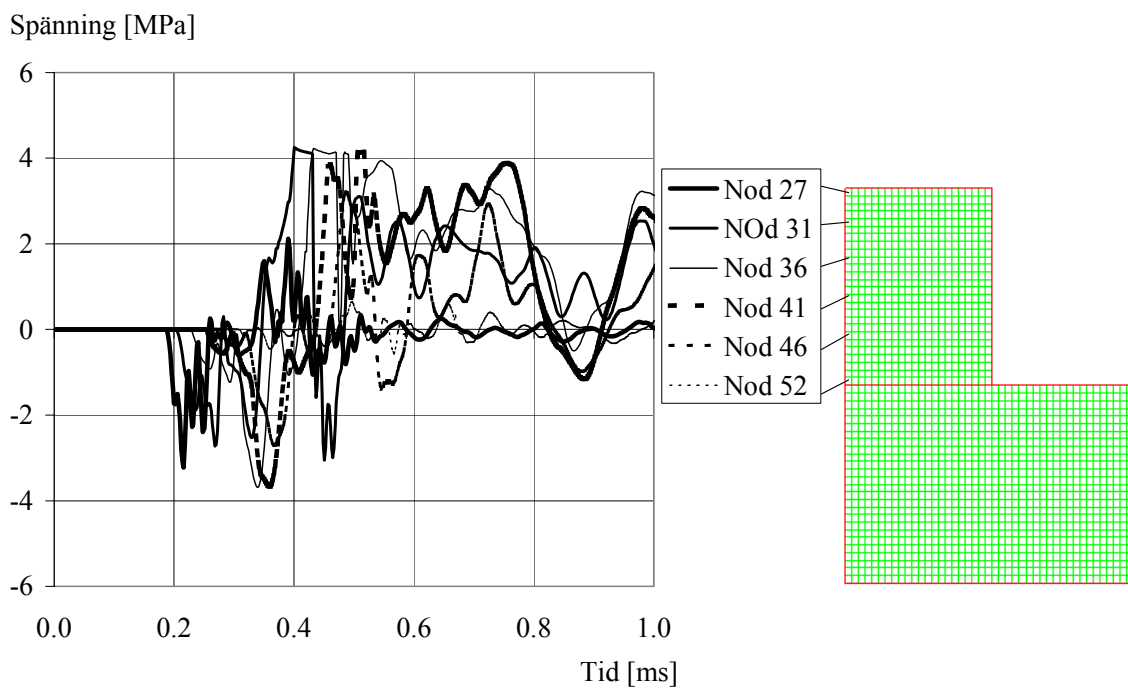
Figur 4.23 Skadegrad från 0 till 1 i betongen för varierande tidpunkter, fix rand.

Även analys där betongfundamentet beaktas har genomförts, där friktionskoefficienten är 0,6 mellan betongblock och fundament. Initialt, i analysen uppför sig betongblocket likvärdigt som om blocket hade fria ränder, jämför spänning i Figur 4.24 och skadegrad i Figur 4.26 med Figur 4.20 och Figur 4.21. Det tryck som passerar kontaktytan underskattas i modellen. Spänningarna som överförs till betongfundamentet visas i Figur 4.25. I denna analys, såsom för analyserna med fria och fixa ränder, bevaras energin i systemet. När tryckvågen har nått botten av fundamentet reflekteras den som en tryckvåg. Efter lång tid blir skadan större jämfört med analys med fria ränder.





Figur 4.24 Spänningsvariation med djupet i betongblock orsakad av stötvågsbelastning, analys med bottenplatta.

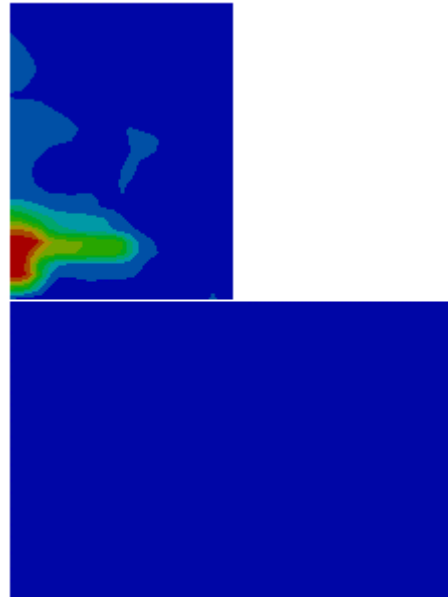


Figur 4.25 Spänningsvariation med djupet i bottenplatta orsakad av stötvågsbelastning, analys med bottenplatta.

$t = 0.25 \text{ ms}$



$t = 5.7 \text{ ms}$



Figur 4.26 Stötvågsbelastning där betongfundament beaktas i analys. Friktionskoefficient mellan betongblock och fundament är 0.6. Skadan är mellan 0-1.

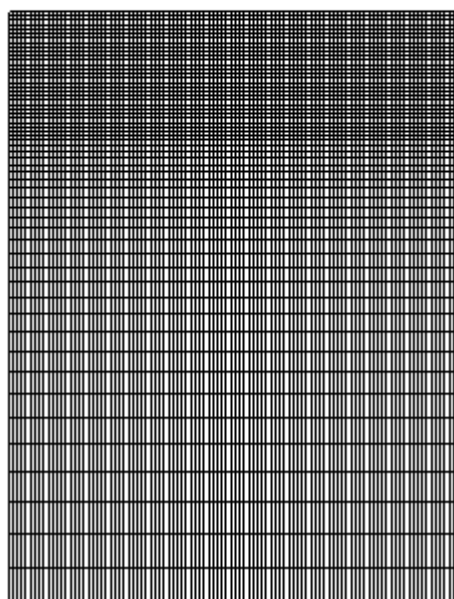
## 4.5 Kombinerad splitter- och stötvågsbelastning

För kombinerade splitter- och stötvågsanalyser har numeriska modellen enligt Figur 4.27 nyttjats. Modellen består av  $100 \times 100 \times 57$  element (totalt 570 000 element för betongblocket), där element är tätare vid splitteranslaget och vid 100 mm från ytan där splitter träffar ökar elementstorleken successivt.

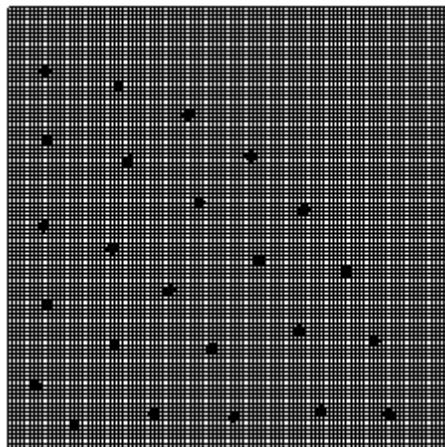
Splitterbelastningen beskrivs i kapitel 4.3 och stötvågsbelastningen i kapitel 4.4. Ankomsttiden för splittret är 0.36 ms (beräknad på en medelhastighet på 1650 m/s och sträck 0.6 m) och tiden för stötvågen från sprängladdningen att nå betongblocket är ca 0.2 ms enligt Conwep. I analysen har stötvågen applicerats vid tidpunkt noll och splittret får en hastighet på 1 650 m/s med ett avstånd på 264 mm ovan betongblock, se Figur 4.27 (motsvarar tidsskillnaden 0.16 ms). Två analyser med olika randvillkor har genomförts, en analys med låsta noder i botten och en med fria noder ränder. För båda analyserna bevaras energin i systemet, vilket innebär att vågen kan fritt reflektera upprepa gånger vid ränderna. Dock förbrukas energi för att åstadkomma skada i betongen. När tryckvågen har nått botten, reflekteras den, och innan den når tillbaka till toppen av betongblocket har splittret börjat penetrera betongkroppen. Analys där betongfundamentet beaktas gick ej att genomföra eftersom modellen blev alltför stor (begränsning på datorkapacitet). Dock, visade analysen med enbart stötvågsbelastning att den del av tryckvåg som överförs till betongfundamentet underskattas.

Analysen med kombinerad splitter- och stötvågsbelastning visar att det är nödvändigt att beakta både splitter- och stötvågsbelastning för att beskriva skadan inuti betongblocket, se Figur 4.28 till Figur 4.30. Figur 4.28 och Figur 4.29 visar jämförelse med experiment och analyser där botten fixerad, och i Figur 4.30 visas jämförelse med experiment och analyser där botten är fri. Analysen visar att det är ett oskadat område under den avskalade betongen. I detta område visade både tryck- och spräckproven att betongens hållfasthet inte var nämnvärt påverkad av splitter- och stötvågsbelastningen, jämför med Figur 3.12 och Figur 3.18.

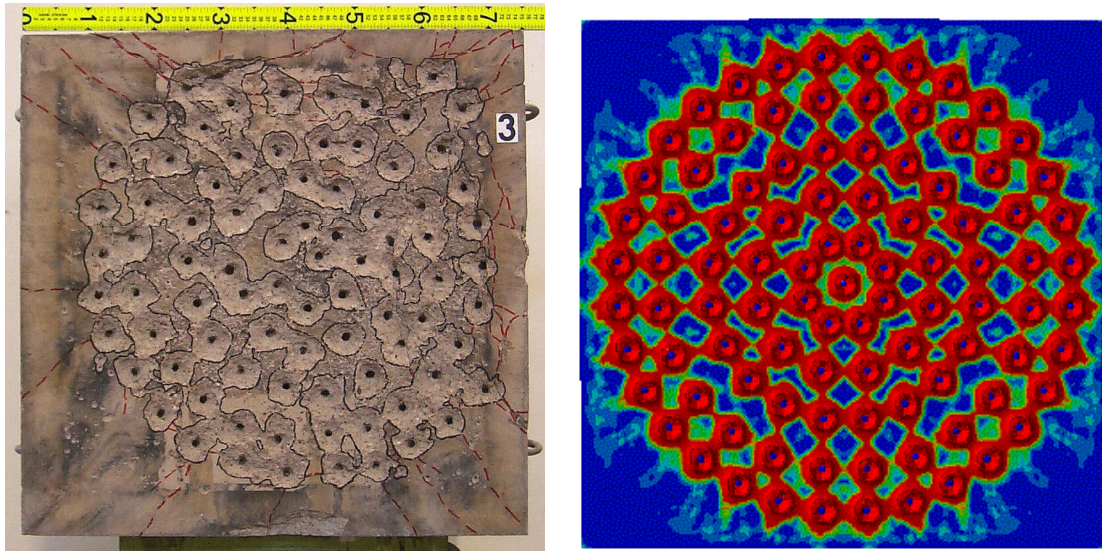
Tvärsnitt (halva blocket)



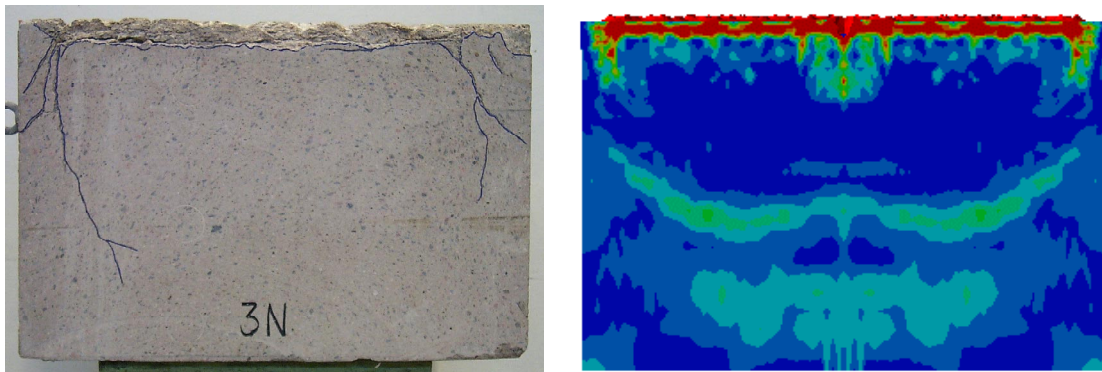
Plan (1/4 block ovanifrån)



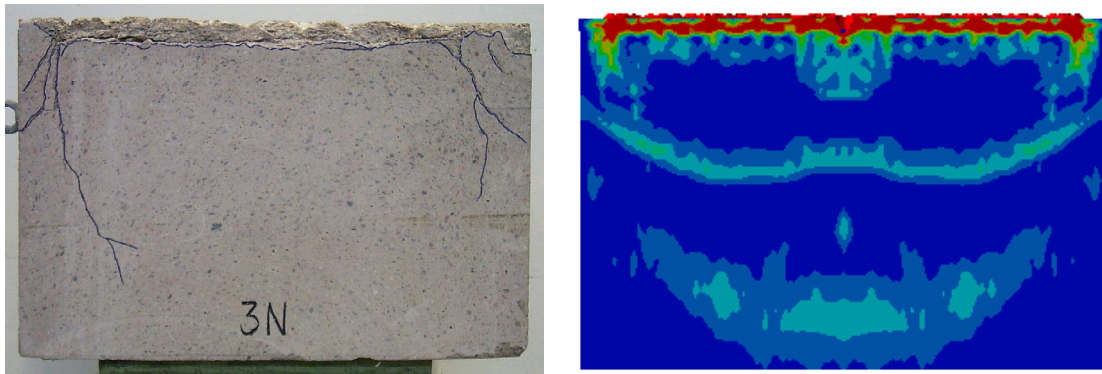
Figur 4.27 Numerisk modell för kombinerad stötvågs- och splitterbelastning.



Figur 4.28 Jämförelse mellan experiment och analys, träffyta. Randvillkor: botten är fixerad.

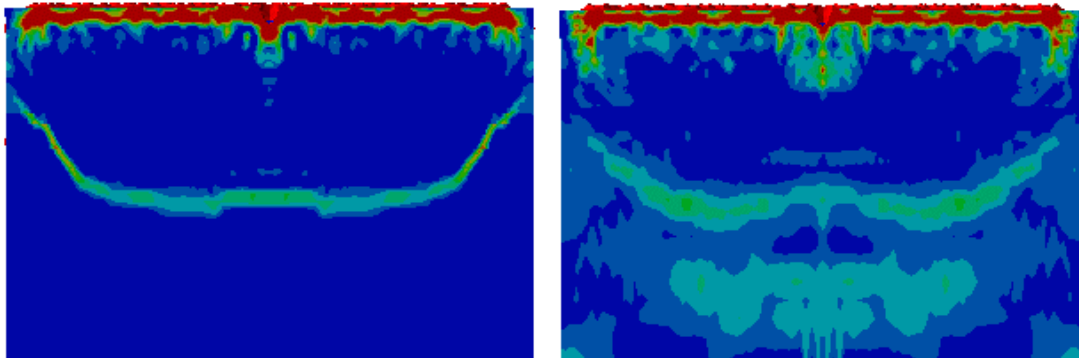


Figur 4.29 Jämförelse mellan experiment och analys, tvärsnitt. Randvillkor: botten är fixerad.



Figur 4.30 Jämförelse mellan experiment och analys, tvärsnitt. Randvillkor: botten är fri.

En intressant jämförelse är analys med splitterinträngning där stötvågen både beaktas och inte beaktas. I Figur 4.31 visas en sådan jämförelse. I dessa analyser är botten fixerad. Själva inträngningsdjupet och avskalningen påverkas inte nämnvärt av den yttre stötvåg som appliceras. Däremot, för analys med enbart splitterbelastningen begränsas skadegraden inuti betongkroppen. Dock uppstår en global sprickplan i ungefär samma område som vid analys med kombinerad splitter- och stötvågsbelastning.



Figur 4.31 Jämförelse mellan analyser med splitterinträngning, där stötvåg beaktas, och ej beaktas. Till vänster: stötvåg beaktas ej. Till höger: stötvåg beaktas. Randvillkor i analyserna: botten är fixerad.

## 5 Diskussion och slutsatser

Då splitter träffar en betongkropp skadas betongens ytskikt, splittret krossar betongen och kratrar bildas i betongen. Samtliga betongkroppar som sågades mitt itu hade synlig skada som var jämnt utbredd över hela ytan. Tryck- och dragprov ur urborrade cylindrar från splitterbelastade betongkroppar visade att på ett avstånd på drygt två gånger det maximala inträngningsdjupet från det avskalade ytan påverkades inte betongens hållfasthet i negativ mening av splitterbelastning.

Det önskvärt att splitterbelastning och stötvågsbelastning separeras i beräkningar. Splitterbelastningen bidrar till avskalning av betong, och betongens effektivhöjd skulle därmed minska. Den impuls som alstras av splittret adderas till impulsen från stötvågen. Impulsen från splittret är betydligt lägre än impulsen från en stötvåg, och denna impuls kan adderas till impulsen för stötvågen, se Forsén och Edin (1991). Resultaten från dessa experiment styrker idén från Nordström (1995) med virtuell avskalning av betong vid splitterbelastning. Nordström studerade energiupptagande förmågan hos splitterbelastade betongplattor. I rapporten redovisas hur betongplattorna kunde beräknas som oskadade med en lägre effektivhöjd, och dessa beräkningar kunde jämföras med en splitterbelastning.

Tryckproven visade att det finns en svag tendens att hållfastheten ökade under splitterbelastningen, den kan troligen förklaras att det blir viss kompaktering av betong under belastningen. Dock är denna kompaktering så pass liten att betongen inte krossas. Numeriska analyser styrker framtagna resultat. Analyserna visar att densiteten ökar under splitterbelastningen, dock är denna ökning väldigt marginell. Analyserna visar också att en tydlig avskalning fås på ytan, vilken motsvarar experimentet väl.

Numeriska analyser visar att randvillkor har stor betydelse gällande stötvågsbelastning. I fallet då betongen är fast förankrad i botten (alla noder i modellen är låsta) fördubblas spänningen vid randen. Betongblocket vill lyfta från marken, men eftersom den är förhindrad att lyfta uppkommer dragspänningar i blocket. På grund av denna tvångskraft som uppkommer bör fixa randvillkor undvikas. I det andra fallet där fri reflektion tillåts, genereras sprickor inuti betongkroppen av den reflekterade dragvågen. I de numeriska analyser där enbart splitterbelastningen beaktades överensstämde skadan väl med experimenten vid anslaget, dock blev skadegraden begränsad inuti betongkroppen. Detta beror på att stötvågen från sprängladdningen inte är beaktad. För analyser med kombinerad splitter- och stötvågsbelastning överensstämde avskalning, samt ökade skadan inuti betongen. Områden där skadan ökade stämde väl med experimenten. I analysen där betongen var oskadad, visade tryck- och spräckprover att även betongen var oskadad på samma område.

Experiment redovisade i denna rapport nyttjades splitter vilka var väldefinierade; SKF kullager kulor med 8 mm i diameter nyttjades som splitterbelastning. Mer forskning behövs inom området splitterbelastning, där motsvarande studier görs för godtyckliga splitter (massa och form). Dessutom är splitterhastigheten, splittertäthet och anslagsvinkel betydande parametrar. Exempelvis visade Nordström att för små splitter och höga splitterhastigheter kunde avskalningen reduceras, vilket förklaras med att splittret har en så hög hastighet att de orsakar små hål istället för en avskalning.

## 6 Referenser

- Attard M. M. och Setunge S. (1996): Stress-strain relationship of confined and unconfined concrete. *ACI Materials Journal*, Vol. 93, No. 5, Sep-Oct 1996, sid. 432-442.
- AUTODYN Manuals (2003): *AUTODYN Manuals, Version 4.3*, Century Dynamics, Inc. 2003, Concord, CA, USA.
- Bischoff P. H. och Perry S. H. (1991): Compressive behaviour of concrete at high strain rates. *Materials and Structures*, Vol. 24, 1991, sid. 425-450.
- CEB-FIB Model Code 1990 (1993): *CEB-FIB Model Code 1990, Design Code*, Thomas Telford, Lausanne, Switzerland, 437 sid.
- ConWep (1992): *Collection of conventional weapons effects calculations based on TM 5-855-1, Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons*, U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, USA.
- Ekengren B. (1998): *Skyddsrumregler SR*, Räddningsverket, Karlstad, Sverige.
- Forsén R. (1997): *Belastning av betongplattor med tryck och splitter från 250 kg minbomber*. 97-00418-311—SE, FOA rapport, Avdelningen för Vapen och skydd, Tumba, 50 sid.
- Forsén R. and Edin K. (1991): *Vapenverkan mot flervånings betongbyggnad III. Bestämning av skador från splitterladdningar mot husfasad i skala 1:4*. C 20860-2.3, FOA report, Sundbyberg, 40 sid.
- Johansson M. (2000): *Structural Behaviour in Concrete Frame Corners of Civil Defence Shelters, Non-linear Finite Element Analyses and Experiments*. Doctoral Thesis, Department of Structural Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 204 sid.
- Johansson M. (2002): *Stötvågsutbredning i luft (in Swedish)*. Publication B54-223/02, Swedish Rescue Service Agency, Karlstad, Sweden.
- Johansson M. (2003): *Composite Action and Confinement Effects in Tubular Steel-Concrete Columns*. Doctoral Thesis, Department of Structural Engineering, Concrete Structures, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 160 sid.
- Krauthammer T. (2000): *Modern Protective Structures, Design, Analysis and Evaluation*. Course notes, The Pennsylvania State University, 358 sid.
- Lundberg B. (1978): *Stöthållfasthet, del I*. STF ingenjörs utbildning, Uppsala.
- Nordström M. (1992): *Splitterbelastning av betongplattor I, Metodik för bestämning av energiupptagande förmåga hos armerade betongplattor belastade med olika splittertätheter*. D 20209-2.3, FOA rapport, Sundbyberg, 54 sid.
- Nordström M. (1993): *Splitterbelastning av betongplattor II, Energiupptagande förmåga hos armerade betongplattor belastade med olika splittertätheter*. D 20226-2.3, FOA rapport, Sundbyberg, 30 sid.

- Nordström M. (1995): *Splitterbelastning av betongplattor III, Energiupptagande förmåga hos armerade betongplattor belastade med olika kombinationer av splitterhastigheter, splitertätheter och splitterstorlekar*. 95-00094-7(6,2.6)--SE, FOA-R, Stockholm, 101 sid.
- Riedel W. (2000): *Beton unter dynamischen Lasten Meso- und makromechanische Modelle und ihre Parameter (in German)*. Doctoral Thesis, Institut Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut, der Bundeswehr Munchen, Freiburg, 210 sid.



# APPENDIX A: Materialprovningar

## Appendix A.1: Kub/Cylinderprotokoll

Kubprotokoll, 18 dygn								
Gjutning: 2002-09-09					Provning: 2003-09-27			
Önskad medel-kub hållfasthet: 47[MPa] vid 28 dygn								
Cylinder	Vikt	Mått			Densitet	Area	Tryckprov	
		b	l	h			Last	f <sub>c</sub>
[nr]	[kg]	[mm]	[mm]	[mm]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[mm <sup>2</sup> ]	[N]	[MPa]
1	7.47	150	150	150	2210	22500	809000	35.96
2	7.46	150	150	150	2210	22500	846000	37.60
3	7.42	151	150	150	2184	22500	843000	37.41
Medelvärde								37.01

Kub/Cylinderprotokoll, 22 dygn									
Gjutning: 2002-09-09					Provning: 2003-10-01				
Önskad medel-kub hållfasthet: 47[MPa] vid 28 dygn									
Kub/ Cylinder	Vikt	Mått				Densitet	Area	Tryck/spräckprov	
		b	l	h	φ			Last	f <sub>c</sub> / f <sub>ct,sp</sub>
[nr]	[kg]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[mm <sup>2</sup> ]	[N]	[MPa]
1	7.48	150	150	150		2216	22500	824000	36.62
2	7.39	150	150	150		2190	22500	845000	37.56
3	7.46	151	150	151		2181	22650	836000	36.91
1	7.59	150	150	150		2249	22500	107000	3.03
2	7.62	150	150	150		2258	22500	109700	3.10
3	7.62	150	151	150		2243	22650	108900	3.06
1	11.75			299.8	149.5	2233	17554	522000	29.74
2	11.77			300.2	149.6	2231	17577	522000	29.70
3	11.74			299.8	149.7	2225	17601	525000	29.83
Medelvärde för kubhållfasthet									37.03
Medelvärde för spräckhållfasthet									3.06
Medelvärde för cylinderhållfasthet									29.75

Kub/Cylinderprotokoll, 28 dygn									
Gjutning: 2002-09-09					Provning: 2003-10-08				
Önskad medel-kub hållfasthet: 47[MPa] vid 28 dygn									
Kub/ Cylinder	Vikt	Mått				Densitet	Area	Tryck/spräckprov	
		b	l	h	$\phi$			Last	$f_c / f_{ct,sp}$
[nr]	[kg]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[mm <sup>2</sup> ]	[N]	[MPa]
1	7.42	150	151	150		2184	22650	896000	39.56
2	7.41	150	150	150		2195	22500	890000	39.56
3	7.38	150	150	150		2187	22650	882000	39.20
1	7.64	150	151	149		2264	22499	104300	2.95
2	7.58	150	150	150		2246	22500	111400	3.15
3	7.65	151	150	150		2252	22500	119700	3.39
1	11.71			298.9	149.5	2232	17554	546000	31.10
2	11.77			299.8	149.6	2234	17577	550000	31.29
3	11.77			300.2	149.6	2231	17577	548000	31.18
Medelvärde för kubhållfasthet									39.44
Medelvärde för spräckhållfasthet									3.16
Medelvärde för cylindrhållfasthet									31.19

## Appendix A.2: Protokoll E-modulsprovning

Protokoll för E-modulsprovning								
Gjutning: 2002-09-09				Provning: 2003-10-08				
Önskad medel-kub hållfasthet: 47[MPa] vid 28 dygn								
Förväntad maxlast: 550 kN, Tryckpressens lastområde/hastighet: 3000/0.35								
Förväntad medelspänning $f_{cm}$ : 31.2 MPa, Trådtöjningsgivarens k-värde: 2.13								
Cylinder	Vikt	Mått		Densitet	Area	Tryckprov		
		h	$\phi$			Last	$f_c / f_{ct,sp}$	$\epsilon_{brott}$
[nr]	[kg]	[mm]	[mm]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[mm <sup>2</sup> ]	[N]	[MPa]	
1	11.78	300.2	149.5	2235	17554	565000	32.19	3690
2	11.79	300.0	149.7	2233	17601	564000	32.04	-
3	11.75	299.7	149.5	2233	17554	571000	32.53	3740

Pålastning till $0.45 f_{cm}$ : $P_{0.45} = 248$ kN			
Vänta 60 s och avläs därefter i 30 s med 10 s intervall			
0 s	$\epsilon = 760 \mu s$	$\epsilon = 764 \mu s$	$\epsilon = 770 \mu s$
10 s	$\epsilon = 763 \mu s$	$\epsilon = 767 \mu s$	$\epsilon = 773 \mu s$
20 s	$\epsilon = 766 \mu s$	$\epsilon = 770 \mu s$	$\epsilon = 776 \mu s$
30 s	$\epsilon = 769 \mu s$	$\epsilon = 773 \mu s$	$\epsilon = 779 \mu s$
	$\epsilon_{mv} = 765 \mu s$	$\epsilon_{mv} = 769 \mu s$	$\epsilon_{mv} = 760 \mu s$
Avlast till $f_c = 0.5$ MPa, vänta 60 s och avläs töjningen:			
$\epsilon = 50 \mu s$	$\epsilon = 58 \mu s$	$\epsilon = 56 \mu s$	
Lasta på till $f_{cm}/3$ : $P_{1/3} = 183$ kN			
Vänta 60 s och avläs töjningen:			
$\epsilon = 587 \mu s$	$\epsilon = 593 \mu s$	$\epsilon = 600 \mu s$	
Avlasta till $f_c = 0.5$ MPa, vänta 60 s och avläs töjningen:			
$\epsilon = 52 \mu s$	$\epsilon = 60 \mu s$	$\epsilon = 59 \mu s$	

Lasta på till $f_{cm}/3$ , vänta 60 s och avläs töjningen:			
$\epsilon = 592 \mu s$	$\epsilon = 594 \mu s$	$\epsilon = 603 \mu s$	
Avlasta till $f_c = 0.5$ MPa, vänta 60 s och avläs töjningen:			
$\epsilon = 54 \mu s$	$\epsilon = 61 \mu s$	$\epsilon = 61 \mu s$	

Belasta till brott, avläs brottlast och brottöjning

Beräkna E-modul enligt svensk STANDARD SS 13 72 32

**Beräknad E-modul: 20.7 GPa**

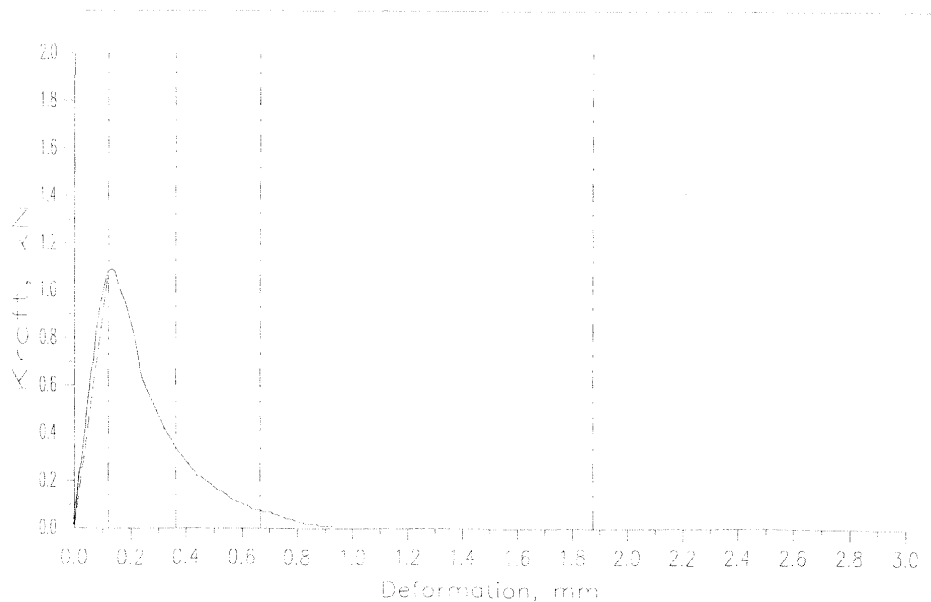
## Appendix A.3: Protokoll RILEM balkar



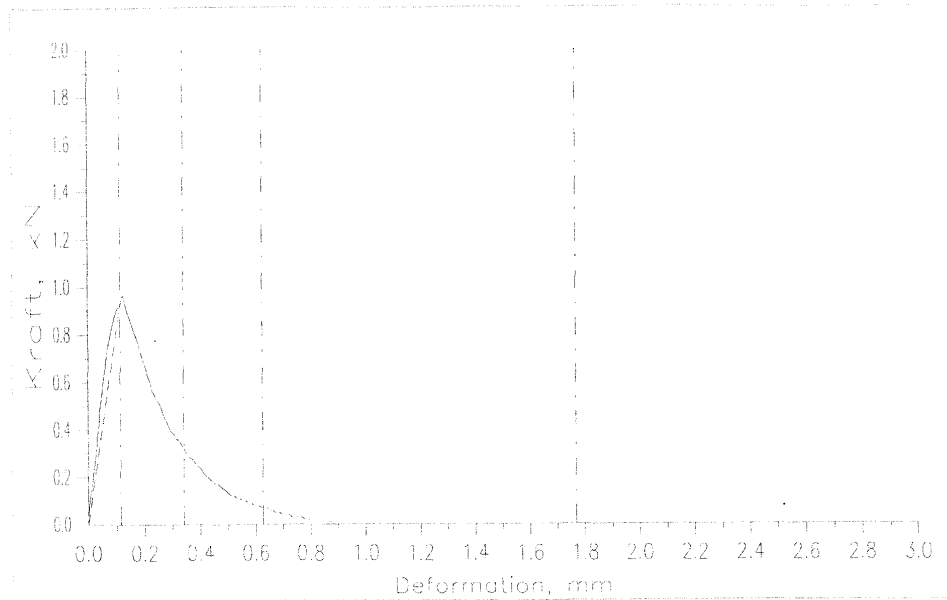
### RAPPORT

Datum/Date	Beteckning/Reference	Sida/Page
2002-10-14	F214712	1 (2) Bilaga 1

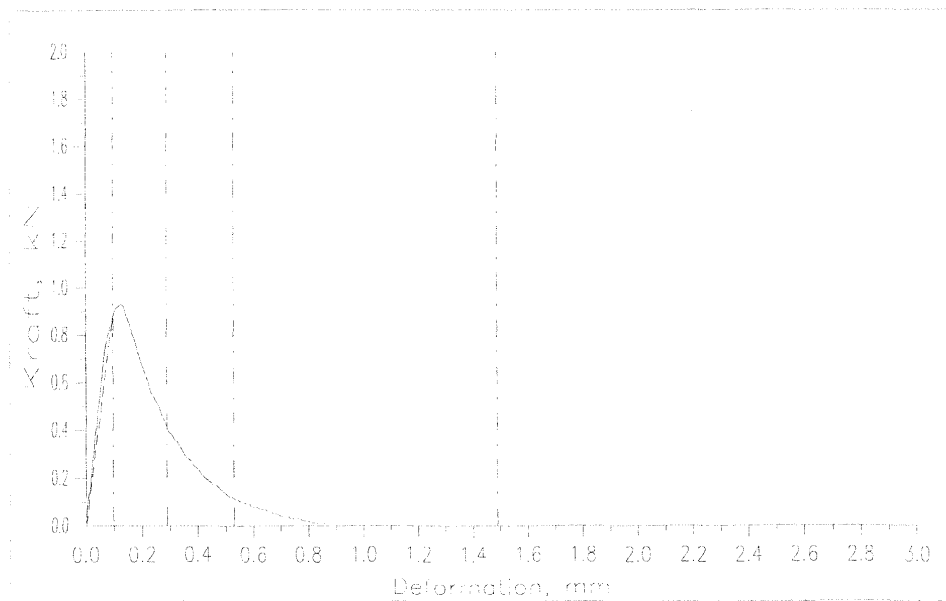
Balk nr	LAB 1	LAB 2	LAB 3
Tillverkningsdatum	2002-09-09	2002-09-09	2002-09-09
Provningsdatum	2002-10-08	2002-10-08	2002-10-08
Dimension BxHxL (mm <sup>3</sup> )	101x100x841	101x101x840	100x101x841
Vikt (g)	18887	18884	18922
Densitet (kg/m <sup>3</sup> )	2225	2205	2230
Last vid första spricka (kN)	1,08	0,92	0,88
Tillhörande deformation (mm)	0,121	0,114	0,096
Ligament BxH <sub>1</sub> (mm <sup>2</sup> )	100,4x56,0	100,0x56,4	100,0x55,9
Deformation $\delta_0$ (mm)	0,90	0,81	0,80
Brottenergi $G_F$ (N/m)	91	81	80
Balkdelarnas vikt (g/g)	9440/9417	9444/9410	9460/9432



Balk LAB 1



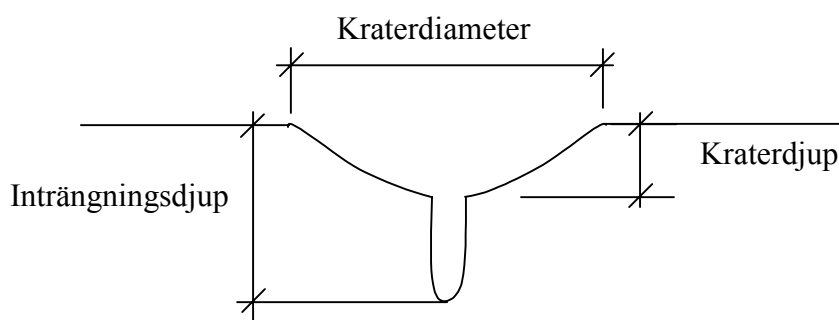
**Balk LAB 2**



**Balk LAB 3**

## APPENDIX B: Mätningar av inträngningsdjup, kraterdiameter och kraterdjup

Inträngningsdjupet, kraterdiameter och kraterdjup mäts med elektroniskt skjutmått. Definitionen av dessa visas i figur B.1. En del kratrar innehöll rester av splittret, dessa är märkta med k i tabellerna nedan. Kraterdiametern mäts med noggrannhet på 5 mm, eftersom dessa inte var perfekt cirkulära. Kraterdjupet mäts strax intill ingången för splitteranslagen.



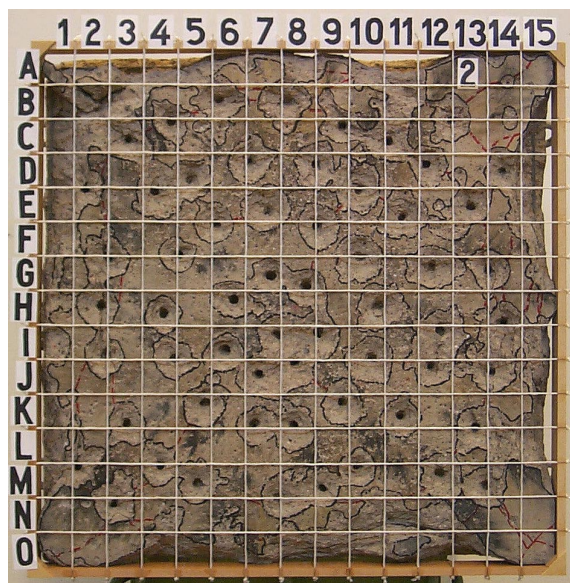
Figur B.1 Definition av inträngningsdjup, kraterdiameter och kraterdjup.

### Appendix B.1: Splittersvärm

Vid mätning av inträngningsdjup, kraterdiameter och kraterdjup, för att lokalisera varje träff användes ett rutnät med indelningen 1 till 15 vågrät och A till O lodrät.

Längst ut vid kanterna av betongkroppen träffade splittret med en vinkel varierande mellan 20 och 27 grader. Mätning av inträngningsdjup utfördes således både lodrätt och med anslagsvinkeln för träffar längst kanterna (vinkeln för dessa mättes ej).

## Appendix B.1.1 Provkropp 2



Figur B.2 Koordinater för mätning av inträngningsdjup, kraterdiameter och kraterdjup.

Tabell B.1 Provkropp 2. Inträngningsdjup, kraterdiameter och kraterdjup. I mätpunkter märkta med k återfanns rester av splitter (kullagerkulan).

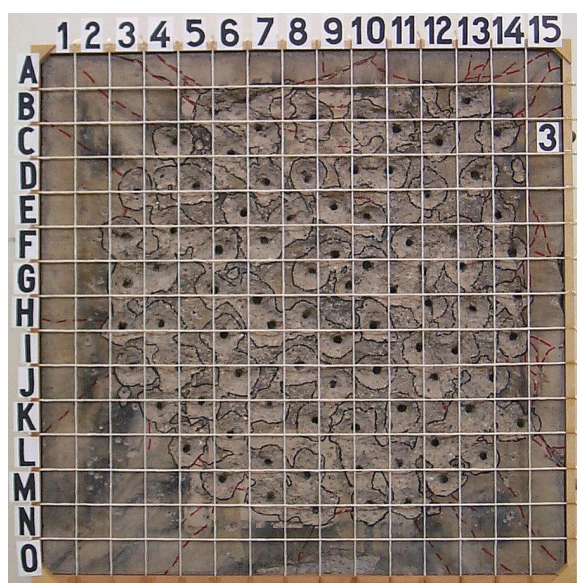
Koordinat	Inträngningsdjup [mm]	Kraterdiameter [mm]	Kraterdjup [mm]	Koordinat	Inträngningsdjup [mm]	Kraterdiameter [mm]	Kraterdjup [mm]
B4	31	45	17	G12	31	60	20.5
B6	33	55	18	G14	35	50	17.5
B8	30	60	15	H2	38	50	16
C3	35	50	15	H4	34	45	12.5
C9 k	34.5	45	12	H6	40	50	14
C11 k	35.5	55	14.5	H10	31	60	20
D5 k	30	50	20	H14	40	60	21
D7 k	32.5	55	16	I2	28.5	50	14.5
D8	38	50	17	I4	29.5	50	13.5
D12	36	45	13.5	I6	39.5	45	13
E4	37	70	18	I7	29.5	-	18
E7	32.5	60	20.5	I9	36.5	-	17.5
E10	33.5	60	18.5	I10	32	60	14
E11 k	32.5	60	17.5	I12	34.5	60	18.5
E13	36	50	16	J7	41.5	-	13
F5	44	45	12	J8	34	-	11.5
F6	34.5	50	15	J12	37	55	16
F9	36	55	16	J14	40	55	20
G3 k	38	55	14	K3	37	45	15
G7	35	45	12.5	K5	32	50	14.5
G8	35.5	50	15	K7	34	50	16
G10	34	60	20	K8	42	55	17

Koordinat	Inträngningsdjup [mm]	Krater diameter [mm]	Kraterdjup [mm]	Koordinat	Inträngningsdjup [mm]	Krater diameter [mm]	Kraterdjup [mm]
K9	37	55	16	M9	38.5	50	15
K11	40	50	19	M10	35.5	45	18
L13	35	55	16	M12	33	55	15
M4	35.5	50	16	M14	30	55	16
M5	34	50	14				

Tabell B.2 Provkropp 2. Inträngningsdjupet är mätt med vinkel.

Koordinat	Inträngningsdjup [mm]	Krater diameter [mm]	Kraterdjup [mm]	Koordinat	Inträngningsdjup [mm]	Krater diameter [mm]	Kraterdjup [mm]
B12	37.5	50	15	K3	41.5	45	11
C3	39	50	19.5	K13	38	55	14
C9	38.5	45	14	M2	45	50	15
D12	40	45	15	M4	42	50	13
D14	37	50	22	M12	35	55	18
E2	52	50	12	M14	34	55	17
H14	41	60	24	N3	42	55	13.5
J14	39.5	55	20				

### Appendix B.1.2 Provkropp 3



Figur B.3 Koordinater för mätning av inträngningsdjup, kraterdiameter och kraterdjup.



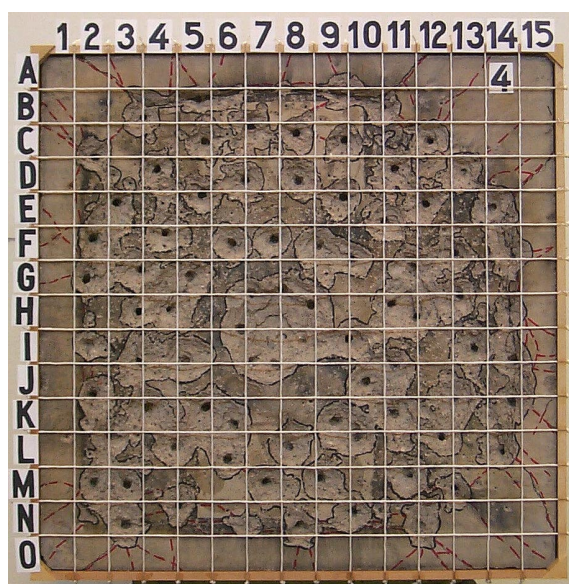
Tabell B.3 Provkropp 3. Inträngningsdjup, kraterdiameter och kraterdjup. I mätpunkter märkta med k återfanns rester av splitter (kullagerkulan).

Koordinat	Inträngningsdjup [mm]	Kraterdiameter [mm]	Kraterdjup [mm]	Koordinat	Inträngningsdjup [mm]	Kraterdiameter [mm]	Kraterdjup [mm]
B5	26	55	14.5	K14	32	45	13
B8	36	50	14.5	L5	29	45	13
B10	26	50	11	L6	33	50	14
B13	32.5	45	15	L7	30	55	15.5
C4	32	50	16	L11 k	28	55	16
C6	32.5	50	14	L12 k	35	55	11
C7	31	50	15	L13 k	25.5	45	11.5
C11	33.5	45	12	M6	28	50	16
C12	37.5	45	11	M7	29	50	21
C14	34	45	12	M8	30.5	45	11.5
D5	30.5	55	17	M10	25.5	-	10
D7	35.5	50	10	M12	27	45	10
D8 k	23	45	9	N8	29	55	10
D10 k	28.5	45	9	N10	24	45	11
D11 k	33.5	55	10	N11 k	24	40	10
D13	33.5	45	18.5	F12	30	-	19
E6	41	45	11	F14	41	45	18.5
E9	36.5	50	15	G3	32	55	11.5
E10	33.5	45	11.5	G4	28	55	21
E12	35	45	16.5	G5	33.5	45	15
E14	35	45	12	G8	33	50	22
F4	33.5	55	10	G9	34	45	18
F6	32.5	50	14	G10	33.5	-	12.5
F9	37	40	15	G11	38	-	13.5
F11	37.5	-	19	G12	41	-	17
J3	26.5	45	13.5	G13	40	50	13
J4	35	55	12.5	H3	31	45	12.5
J6 k	30.5	55	18	H4	31	55	11.5
J8	30	55	16	H7	35	55	15
J9	27.5	50	14.5	H7	30.5	55	11
J10	35	50	13	H8 k	27.5	45	21.5
J12	38	50	20.5	H10	34.5	45	11
J13	38	50	10.5	H12	42	45	19
K4	26	50	10.5	H13 k	34.5	50	14.5
K5	29	50	9	H14	32.5	45	13
K7	29	50	14.5	I6	39	50	13
K8	41	45	14	I9	36.5	45	12
K10	34	45	13.5	I11	33	-	14
K11	41	45	14	I12	36.5	-	11
K13	30.5	-	16	I14	40	40	16.5

Tabell B.4 Provkropp 3. Inträngningsdjupet mätt med vinkel.

Koordinat	Inträngningsdjup [mm]	Krater diameter [mm]	Kraterdjup [mm]	Koordinat	Inträngningsdjup [mm]	Krater diameter [mm]	Kraterdjup [mm]
B8	37	50	16.5	H3	32.5	45	11
B13	33.5	45	15	K4	31.5	50	11
C6	31	50	13.5	L5	38	45	13
C12	34.5	45	18.5	L6	40	50	12
D3	38	45	17	L12	34.5	55	12.5
E14	47	45	9	L13	32	45	13.5
F4	34	55	15.5	M6	36	50	9
F14	36	45	12	M12	35	45	13
G14	40.5	45	16	N8	33.5	55	14

#### Appendix B.1.3 Provkropp 4



Figur B.4 Koordinater för mätning av inträngningsdjup, kraterdiameter och kraterdjup.

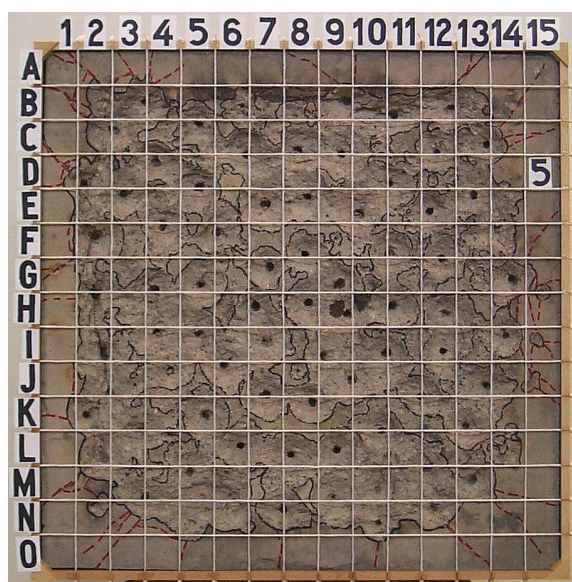
Tabell B.5 Provkropp 4. Inträngningsdjup, kraterdiameter och kraterdjup. I mätpunkter märkta med k återfanns rester av splitter (kullagerkulan).

Koordinat	Inträngningsdjup [mm]	Kraterdiameter [mm]	Kraterdjup [mm]	Koordinat	Inträngningsdjup [mm]	Kraterdiameter [mm]	Kraterdjup [mm]
C5	31	55	12	H11	41	-	19.5
C7	30	55	19	H12	40	-	23.5
C8	34.5	45	11	I3	32	60	12
C9	34	45	14	I5	29	60	18
C12 k	33.5	50	12	I7	31	-	25
D4	33.5	45	11	I9	39.5	55	16
D6	33	55	15	I13	36.5	55	18
D8	34	55	15	J7	32.5	-	19
D11	35.5	50	11	J10 k	35.5	-	22.5
E3	36	50	11	J11	30	-	24
E5	32	50	11	K4	33	60	20
E9	34.5	50	14	K5	40	60	15
E11	27	55	16.5	K6	35	-	22
E12	35.5	50	16	K9	28	60	14
F2	37	55	15	K11	31.5	-	17
F4	33	55	14	K13	29	-	16
F6	31	55	14	L4	29	60	15
F7 k	30	50	14.5	L6	31	50	12
F9	28	60	18	L8	30	55	16.5
F10	36	45	13	L10	33.5	60	17
F13	36	50	14	L12	36	50	13
G2	36	50	13	M2	31.5	-	11
G3	37.5	60	13	M3	37	-	11
G5	29	60	17.5	M7	37	55	17
G7	27	-	20	M9 k	33	55	16
G8 k	34	-	25	M11 k	29.5	55	16
G13	33	50	9	M13	33.5	40	12
H3	46.5	45	16	N3	28	50	12
H4	35	-	20	N4	35	45	13
H6	34	-	21	N8 k	28	45	15
H8	35	-	24.5	N10	34.5	50	12

Tabell B.6 Provkropp 4. Inträngningsdjupet är mätt med vinkel.

Koordinat	Inträngningsdjup [mm]	Krater diameter [mm]	Kraterdjup [mm]	Koordinat	Inträngningsdjup [mm]	Krater diameter [mm]	Kraterdjup [mm]
B3	35	50	12.5	J14	34.5	50	13.5
C2	38.5	45	12	L2	34.5	55	14
C5	31	55	13.5	L12	45	50	16
C8 k	34	45	11	L14	44.5	50	16.5
C12 k	36	50	12	M2	35	-	13
E3	40.5	50	11	M3	40.5	-	13
E12	28	50	12.5	M11	33	55	15.5
G2	34.5	50	11	N3	34	50	14
I13	36	55	17	N4	35	45	12
J2	33.5	55	10	N10	35	50	11.5

#### Appendix B.1.4 Provkropp 5



Figur B.5 Koordinater för mätning av inträngningsdjup, kraterdiameter och kraterdjup.

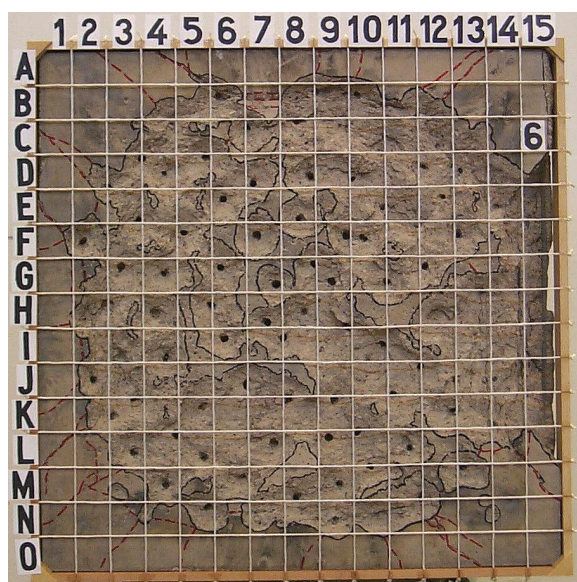
Tabell B.7 Provkropp 5. Inträngningsdjup, kraterdiameter och kraterdjup. I mätpunkter märkta med k återfanns rester av splitter (kullagerkulan).

Koordinat	Inträngningsdjup [mm]	Kraterdiameter [mm]	Kraterdjup [mm]	Koordinat	Inträngningsdjup [mm]	Kraterdiameter [mm]	Kraterdjup [mm]
B9	32	-	15	H12	30	70	20
B11	36.5	55	20	I4 k	37	-	19
C5	36	60	18	I5	35.5	-	21
C6	39	60	23	I7	30	-	22.5
C8	37	60	19	I9	33	-	20.5
C9	38	-	20	I11	36.5	70	22
C12 k	26	55	16	I12 k	48	55	20
C13	33	55	15	I14	31.5	55	15.5
D2	32.5	-	17.5	J4	45	-	17
D4	30	50	16	J6	37	70	17.5
D5	31.5	60	18	J7	29.5	70	18.5
D11	34.5	60	18	J9	38	-	23.5
E7	36	75	19	J13	41	-	21.5
E8 k	32	70	19	K2	28.5	-	18
E10	37.5	-	17	K5 k	32	60	14.5
E12	36.5	60	13	K8	32	60	16.5
E13	31.5	-	13	K11	33	55	13.5
F2	35	65	17.5	K13	33	65	20
F4	34.5	60	19	L2	27	75	14
F6	28	55	20	L3	28	60	19
F8	50	55	16	L6	40	60	16
F11 k	31	60	20	L8 k	36.5	70	24
F12 k	32	60	16.5	L9	43	65	12
G4	34.5	-	20.5	L10	41	60	18
G5 k	35	65	16.5	M5	30.5	65	17.5
G7	29	50	14	M10	26.5	-	18.5
G9	31.5	-	18	M12	31	-	18.5
G14	35.5	50	14.5	M13	27.5	55	15
H7 k	41	50	15.5	N3	29	50	17
H8 k	37.5	-	15	N7	37	60	15
H9	31.5	-	19	N12	32	-	18.5
H11	38.5	65	18				

Tabell B.8 Provkropp 5. Inträngningsdjupet är mätt med vinkel.

Koordinat	Inträngningsdjup [mm]	Krater diameter [mm]	Kraterdjup [mm]	Koordinat	Inträngningsdjup [mm]	Krater diameter [mm]	Kraterdjup [mm]
B3	38	65	16.5	H2	42	55	15
B9	35.5	-	16.5	I2	38	-	14.5
B12	35.5	55	15.5	I14	31	55	16.5
C2	35	65	21	J2	37	-	20
C5	39	60	14	J13	38.5	-	21
C13	38	55	13.5	K2	37.5	-	22
D2	36.5	-	14.5	L2	29	75	13
E3	34	65	12	M3	36	55	19
E13	33	-	18	N7	37.5	60	15.5
G14	37.5	50	13.5				

### Appendix B.1.5 Provkropp 6



Figur B.6 Koordinater för mätning av inträngningsdjup, kraterdiameter och kraterdjup.

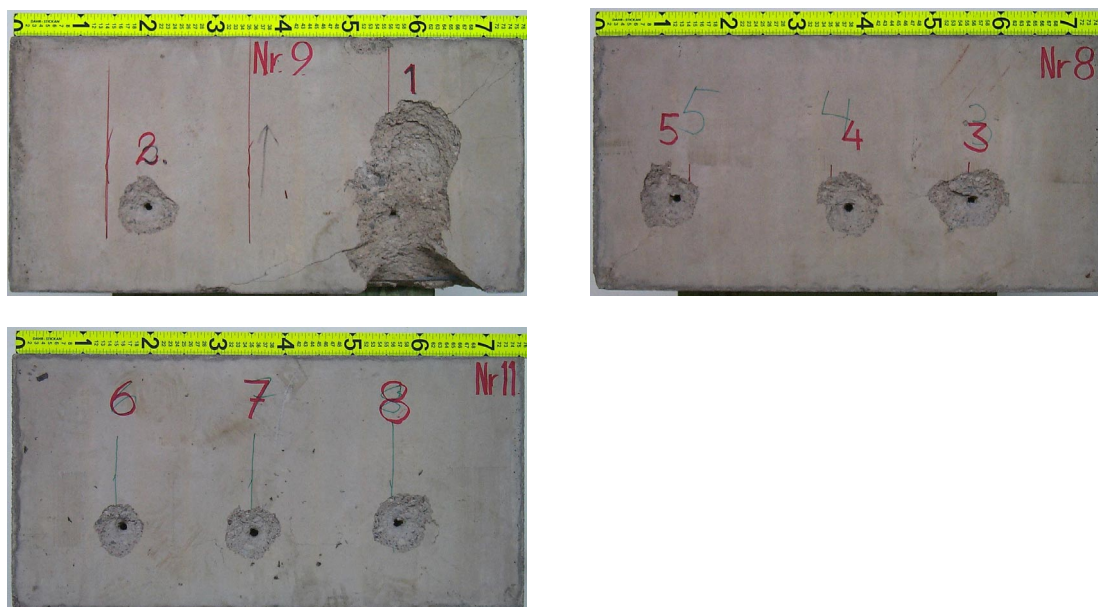
Tabell B.9 Provkropp 6. Inträngningsdjup, kraterdiameter och kraterdjup. I mätpunkter märkta med k återfanns rester av splitter (kullagerkulan).

Koordinat	Inträngningsdjup [mm]	Kraterdiameter [mm]	Kraterdjup [mm]	Koordinat	Inträngningsdjup [mm]	Kraterdiameter [mm]	Kraterdjup [mm]
B6	29	55	10	H7	45	50	14.5
B10	32.5	-	25	H8	34	-	24
C4	24	55	16	H9	35	-	23
C7	29.5	50	15	H13	33.5	-	25
C8	36	-	17.5	I4	33	60	18.5
C9	34	-	29.5	I6	37	60	16
C12	31	-	22	I7	37	-	17
D2	34.5	45	10	I10	38.5	-	26
D3	31.5	-	12.5	J2	32	-	14
D5	34	55	16.5	J6	33	-	18
D7	44	55	12.5	J11	34	-	16.5
D8	35.5	-	20.5	K2	24	-	12.5
D10	32.5	-	23	K3	30	-	19.5
D13 k	27.5	-	21	K5	31	-	21.5
E3	36	55	16.5	K8	33	-	21
E6	32	55	14.5	K9	35	-	22
E8 k	33	55	15.5	K11 k	28	-	16
E12 k	35.5	-	27	K12	34.5	-	17
F2	33.5	50	18	L3	26.5	-	14
F5	41	-	16.5	L4	41	-	18
F7	32	55	13	L5	32.5	-	18.5
F9	39	-	19	L7	28.5	-	17
F10	39	-	24.5	L9	38	-	20
F13	36.5	-	18	L10	35.5	-	20
G3	28	-	11	L11 k	26.5	55	19
G4	30	60	18.5	M4	27.5	45	12
G6	41.5	60	16.5	M6	29	60	19
G7	46.5	45	12	M9	32	-	20
G8	41	55	10	M10	39.5	-	15
G9	35	-	20	M13	29	55	15
G11	32.5	60	16	N5	32	55	15
G12 k	33	-	16	N8	38	-	17
H4	25.5	-	15.5	N12	29.5	55	16.5
H5	32.5	60	13				

Tabell B.10 Provkropp 6. Inträngningsdjupet är mätt med vinkel.

Koordinat	Inträngningsdjup [mm]	Krater diameter [mm]	Kraterdjup [mm]	Koordinat	Inträngningsdjup [mm]	Krater diameter [mm]	Kraterdjup [mm]
D2	37.5	45	10	L3	31.5	-	15
D5	37.5	55	17	L4	35.5	-	17.5
F5	44	-	14	M5	27	45	11
F13	37	-	17	M8	44	-	21.5
J2	33.5	-	13	M10	43.5	-	17.5
K2	32.5	-	20	M13	36	55	14

### Appendix B.2: Enstaka splitter



Figur B.7 Provkropp 8, 9 och 11. Provkropp 9 beskjöts med skott nr.1 och nr.2, provkropp 8 med skott nr.3, nr.4 och nr.5, provkropp 11 med skott nr.6, nr.7 och nr.8

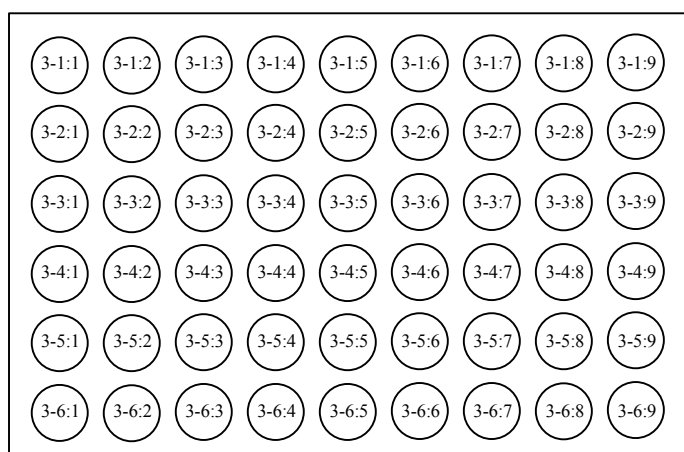
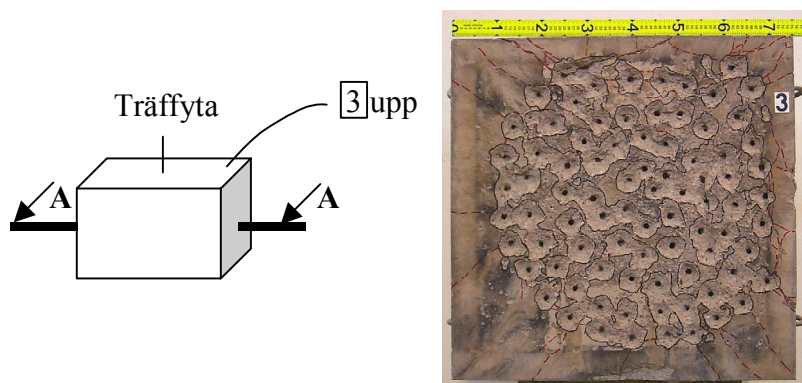
Tabell B.11 Inträngningsdjup, kraterdiameter och kraterdjup för enstaka splitter.

Skott	Inträngningsdjup [mm]	Kraterdiameter [mm]	Kraterdjup [mm]
nr.1	53.5	-	-
nr.2	52.5	84.0	14.0
nr.3	57.0	98.0	16.0
nr.4	54.0	92.5	15.0
nr.5	56.5	93.0	15.0
nr.6	56.5	73.5	12.0
nr.7	53.5	80.0	14.0
nr.8	54.0	92.0	13.0



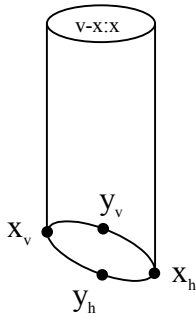
## APPENDIX C: Borrkärnor, mätning av sprickplan

Provkropp 3 har sågats itu och borrkärnor borrats från två olika riktningar, dels horisontellt och dels vertikalt. Borrkärnor vilka är borrade horisontellt är märkta med 3-n:l, där n anger nivån från träffytan och l anger läget i planet, se figur C.1. Borrkärnor vilka är borrade vertikalt är märkta med v-x:x där x:n anger läget i planet se figur C.3. De borrade cylindrar som gick av avståndet till sprickplanet i fyra punkter, mätpunkterna visas i figur C.2. I tabell C.1 och C.2 redovisas mätningarna för dessa punkter.



### Snitt A-A

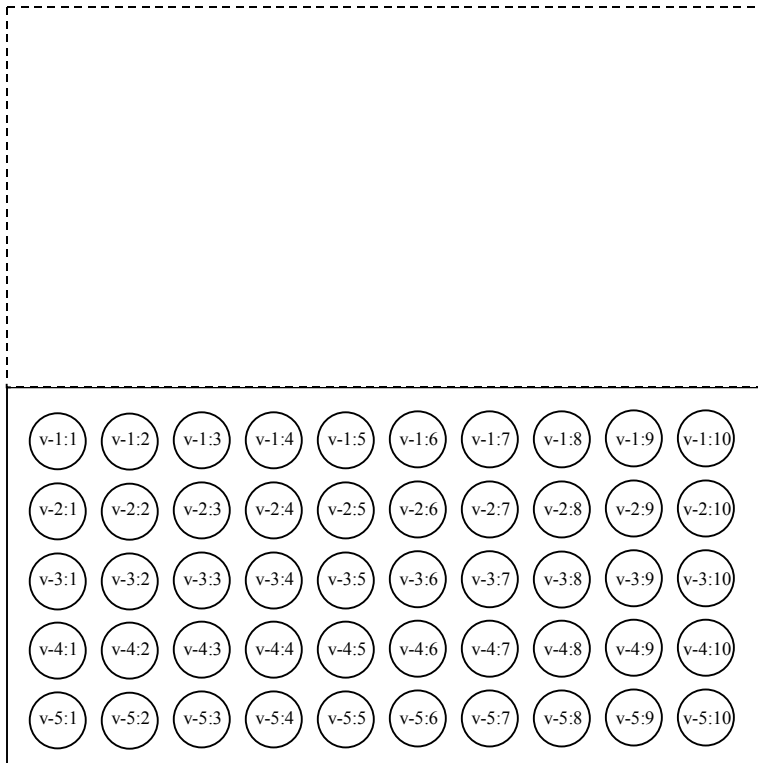
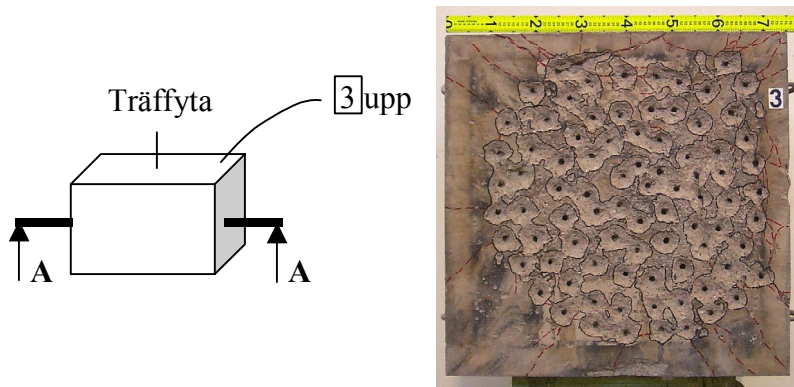
Figur C.1 Borrkärnors placering i horisontell riktning.



Figur C.2 Mätpunkter för bestämning av sprickplan.

Tabell C.1 Koordinater i horisontell riktning för bestämning av sprickplan.

	$x_v$	$x_h$	$y_v$	$y_h$		$x_v$	$x_h$	$y_v$	$y_h$
3-1:9	170	158	174	144	3-4:4	133	172	83	132
3-2:3	80	64	78	65	3-4:4	133	128	138	132
3-2:3	109	87	107	92	3-4:5	58	15	50	38
3-2:5	46	25	20	62	3-4:6	130	140	143	130
3-2:5	59	54	45	56	3-4:7	144	161	155	150
3-2:7	90	100	86	96	3-4:9	290	288	294	289
3-2:8	110	146	125	278	3-5:3	253	211	258	228
3-2:8	270	288	140	275	3-5:5	67	30	78	50
3-3:3	75	75	105	75	3-5:5	141	141	135	147
3-3:3	150	105	160	115	3-5:5	203	202	198	198
3-3:4	83	72	83	72	3-5:8	203	216	103	212
3-3:5	70	65	80	63	3-5:9	153	156	155	288
3-3:6	77	80	78	80	3-5:9	290	290	156	292
3-3:7	90	102	105	90	3-6:3	294	250	285	262
3-3:8	108	139	127	118	3-6:6	220	215	220	220
3-4:2	204	176	227	178					



### Snitt A-A

Figur C.3 Borrkärnors placering i vertikal riktning.

Tabell C.2 Koordinater i vertikal riktning för bestämning av sprickplan.

	xv	xh	vv	vh		xv	xh	vv	vh
v-1:1	255	250	253	255	v-4:1	50	49	50	49
v-1:2	202	172	184	170	v-4:1	165	170	170	170
v-1:3	173	170	167	175	v-4:1	312	306	314	305
v-1:4	168	154	166	158	v-4:2	342	300	333	303
v-1:5	238	242	243	236	v-4:3	100	101	113	100
v-1:6	185	192	194	182	v-4:3	236	210	250	205
v-1:6	250	263	246	260	v-4:3	353	400	308	425
v-1:7	173	183	182	173	v-4:4	198	215	233	182
v-1:8	182	186	190	177	v-4:5	200	218	246	182
v-1:9	178	205	201	195	v-4:6	187	202	217	175
v-1:10	176	173	175	175	v-4:7	201	205	225	189
					v-4:8	218	252	252	212
v-2:1	258	258	280	258	v-4:9	260	291	293	275
v-2:2	217	167	228	185	v-4:10	244	233	237	241
v-2:3	170	145	170	148					
v-2:3	192	191	197	185	v-5:1	312	304	308	310
v-2:4	177	173	176	173	v-5:2	328	336	327	330
v-2:5	166	172	170	170	v-5:3	357	343	355	315
v-2:6	188	194	195	187	v-5:4	275	284	282	275
v-2:7	161	167	170	168	v-5:4	338	330	330	335
v-2:8	173	184	184	167	v-5:5	298	301	298	292
v-2:9	200	226	214	205	v-5:6	310	308	302	322
v-2:10	258	272	279	258	v-5:7	328	360	345	350
					v-5:8	299	295	305	302
v-3:1	253	253	263	248	v-5:9	373	385	377	384
v-3:1	315	325	332	301	v-5:10	301	304	307	298
v-3:2	132	113	132	122					
v-3:2	282	305	253	310					
v-3:3	203	190	200	188					
v-3:4	145	158	163	137					
v-3:5	164	174	176	166					
v-3:6	180	185	185	192					
v-3:7	155	170	167	160					
v-3:8	126	121	121	120					
v-3:8	190	210	210	190					
v-3:9	218	283	265	217					
v-3:10	293	305	324	285					

## APPENDIX D: Cylinderprotokoll för tryck- och spräckprov efter splitterbelastning

### Appendix D.1: Tryckprov, horisontella cylindrar. Block 7 är referensblock.

Cylinderprotokoll								
Gjutning: 2002-09-09					Provning: 2003-03-10			
Önskad medel-kub hållfasthet: 47[MPa] vid 28 dygn								
Cylinder	Vikt	Mått		Densitet	Area	Tryckprov		Medel-höjd
		h	$\phi$			Last	$f_c$	
[nr]	[kg]	[mm]	[mm]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[mm <sup>2</sup> ]	[N]	[MPa]	[mm]
7-2:5a	0.460	100.0	51.3	2226	2067	59100	28.6	350
7-2:5b	0.460	100.2	51.3	2221	2067	53400	25.8	350
7-2:5c	0.459	100.0	51.3	2221	2067	52700	25.5	350
7-4:6a	0.455	99.5	51.2	2221	2059	53000	25.7	200
7-4:6b	0.457	100.2	51.2	2215	2059	44000	21.4	200
7-4:6c	0.456	99.9	51.2	2217	2059	49900	24.2	200
7-6:6a	0.457	99.9	51.2	2222	2059	56500	27.4	50
7-6:6b	0.457	99.7	51.2	2226	2059	52000	25.3	50
7-6:6c	0.457	99.5	51.2	2231	2059	51600	25.1	50
3-2:3a	0.451	99.8	51.1	2204	2051	50200	24.5	350
3-2:7a	0.456	99.9	51.2	2217	2059	57500	27.9	350
3-2:7b	0.454	99.9	51.2	2207	2059	51500	25.0	350
3-3:3b	0.453	100.1	51.1	2207	2051	51200	25.0	275
3-3:5a	0.450	99.1	51.2	2206	2059	55800	27.1	275
3-3:5b	0.454	99.7	51.2	2212	2059	48000	23.3	275
3-3:6a	0.453	99.6	51.2	2209	2059	55700	27.1	275
3-3:6b	0.461	101.1	51.2	2215	2059	48700	23.7	275
3-4:4a	0.451	99.2	51.1	2217	2051	58000	28.3	200
3-4:4b	0.453	99.8	51.1	2213	2051	49300	24.0	200
3-4:5a	0.457	100.1	51.3	2209	2067	50800	24.6	200
3-4:5b	0.458	100.1	51.3	2214	2067	43000	20.8	200
3-5:3a	0.452	100.0	51.1	2204	2051	58000	28.3	125
3-5:3b	0.451	100.1	51.1	2197	2051	59400	29.0	125
3-5:9a	0.458	100.3	51.3	2209	2067	58500	28.3	125
3-5:9b	0.459	100.5	51.3	2210	2067	55100	26.7	125
3-6:4a	0.448	99.7	51.1	2191	2051	52000	25.4	50
3-6:4b	0.452	100.2	51.1	2200	2051	52400	25.6	50
3-6:6b <sup>a</sup>	0.455	100.2	51.3	2197	2067	40700	19.7	50

a) provkroppen var sned med varierande höjd mellan 100-104 mm.

**Appendix D.2: Tryckprov, vertikala cylindrar. Block 7 är referensblock.**

Cylinderprotokoll								
Gjutning: 2002-09-09			Provning: 2003-03-10 (block 3), 2003-05-20 (block 4 och 6)					
Önskad medel-kub hållfasthet: 47[MPa] vid 28 dygn								
Cylinder	Vikt	Mått		Densitet	Area	Tryckprov		Medel-höjd
		h	φ			Last	f <sub>cc</sub>	
[nr]	[kg]	[mm]	[mm]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[mm <sup>2</sup> ]	[N]	[MPa]	[mm]
7v-3:4a	0.455	100.2	51.2	2206	2059	43300	21.0	90
7v-3:4b	0.455	100.1	51.2	2208	2059	58900	28.6	190
7v-3:4c	0.456	99.0	51.2	2237	2059	56300	27.4	290
7v-3:6a	0.457	98.9	51.2	2244	2059	60500	29.4	90
7v-3:6b	0.456	100.7	51.2	2199	2059	62400	30.3	190
7v-3:6c	0.451	100.0	51.2	2191	2059	57800	28.1	290
7v-3:8a	0.451	100.0	51.2	2191	2059	61200	29.7	90
7v-3:8b	0.458	100.0	51.2	2225	2059	60700	29.5	190
7v-3:8c	0.455	99.9	51.2	2212	2059	60200	29.2	290
7v-4:5a	0.452	99.0	51.2	2218	2059	60800	29.5	55
7v-4:5b	0.429	98.7	51.2	2111	2059	61300	29.8	260
7v-4:5c	0.43	98.9	51.2	2112	2059	57800	28.1	360
7v-4:6a	0.426	98.1	51.2	2109	2059	59900	29.1	55
7v-4:6b	0.434	99.7	51.2	2114	2059	57100	27.7	260
7v-4:6c	0.433	99.8	51.2	2107	2059	53000	25.7	360
7v-4:8a	0.434	99.8	51.2	2112	2059	62500	30.4	55
7v-4:8b	0.434	99.8	51.2	2112	2059	60900	29.6	260
7v-4:8c	0.43	99.2	51.2	2105	2059	53400	25.9	360
3v-1:1a	0.451	99.0	51.3	2204	2067	49100	23.8	90
3v-1:1b	0.458	100.3	51.3	2209	2067	49700	24.1	190
3v-1:5a	0.458	99.9	51.3	2218	2067	56800	27.5	55
3v-1:5b	0.456	100.1	51.3	2204	2067	53200	25.7	155
3v-1:6a	0.459	100.5	51.3	2210	2067	55400	26.8	90
3v-1:6a	0.449	98.2	51.3	2212	2067	62100	30.0	360
3v-1:7a	0.454	99.6	51.3	2205	2067	55700	27.0	90
3v-1:7b	0.454	99.7	51.3	2203	2067	59200	28.6	260
3v-1:7c	0.454	100.4	51.3	2188	2067	59600	28.8	360
3v-2:1a	0.459	100.7	51.3	2205	2067	51500	24.9	90
3v-2:1b	0.457	100.4	51.3	2202	2067	48500	23.5	190
3v-2:4a	0.459	100.8	51.3	2203	2067	52600	25.5	90
3v-2:4b	0.460	100.7	51.3	2210	2067	59100	28.6	260
3v-2:4c	0.455	99.2	51.3	2219	2067	60800	29.4	360
3v-2:6a	0.458	99.9	51.3	2218	2067	56700	27.4	90
3v-2:6b	0.455	99.7	51.3	2208	2067	59700	28.9	260
3v-2:6c	0.452	98.9	51.3	2211	2067	63700	30.8	360
3v-2:7a	0.456	100.1	51.3	2204	2067	53400	25.8	90
3v-2:7b	0.453	99.1	51.3	2216	2067	59200	28.6	260
3v-2:7c	0.458	100.2	51.3	2211	2067	60600	29.3	360

3v-3:4a	0.456	100.2	51.3	2202	2067	54700	26.5	55
3v-3:4b	0.459	100.5	51.3	2210	2067	61800	29.9	262
3v-3:4c	0.462	100.8	51.3	2217	2067	64300	31.1	362
3v-3:5a	0.458	100.3	51.3	2209	2067	53100	25.7	90
3v-3:5b	0.460	100.8	51.3	2208	2067	57500	27.8	260
3v-3:5c	0.462	100.7	51.3	2220	2067	62200	30.1	360
3v-3:7a	0.452	98.9	51.3	2211	2067	50500	24.4	90
3v-3:7b	0.459	100.4	51.3	2219	2067	43800	21.2	260
3v-3:7c	0.453	99.1	51.3	2216	2067	64200	31.1	360
3v-3:9a	0.454	99.2	51.3	2214	2067	47700	23.1	55
3v-3:9b	0.458	100.1	51.3	2214	2067	50100	24.2	155
3v-3:9c	0.462	100.5	51.3	2224	2067	47800	23.1	355
3v-4:2a	0.461	100.4	51.3	2221	2067	54700	26.5	90
3v-4:2b	0.458	100.6	51.3	2203	2067	50500	24.4	190
3v-4:8a	0.453	98.9	51.3	2216	2067	49500	25.0	55
3v-4:8b	0.450	98.2	51.3	2217	2067	50200	24.3	155
3v-4:8c <sup>a</sup>	0.454	100.3	51.3	2190	2067	27800	13.5	355
3v-5:3a	0.455	99.7	51.3	2208	2067	50900	24.6	90
3v-5:3b	0.457	100.1	51.3	2209	2067	51100	24.7	190
3v-5:4a	0.458	100.4	51.3	2207	2067	44400	21.5	55
3v-5:4b	0.449	99.0	51.3	2194	2067	25800	12.5	155
3v-5:5a	0.457	100.4	51.3	2202	2067	49800	24.1	55
3v-5:5b	0.456	100.2	51.3	2202	2067	53000	25.6	155
3v-5:7a	0.451	99.2	51.3	2200	2067	46300	22.4	90
3v-5:7b	0.456	100.2	51.3	2202	2067	48400	23.4	190
3v-5:8a	0.456	100.0	51.3	2206	2067	46200	22.4	90
3v-5:8b	0.456	100.0	51.3	2206	2067	50700	24.5	190
4v-1:6a	0.441	100.4	51.3	2125	2067	54000	26.1	90
4v-1:6b	0.430	98.0	51.3	2129	2067	63900	30.9	260
4v-1:6c	0.431	98.4	51.3	2119	2067	60100	29.1	360
4v-2:6a	0.427	97.6	51.3	2117	2067	54800	26.5	90
4v-2:6b	0.439	99.7	51.3	2130	2067	64400	31.2	260
4v-2:6c	0.439	100.1	51.3	2122	2067	61100	29.6	360
4v-2:7a	0.441	100.3	51.3	2127	2067	54300	26.3	90
4v-2:7b	0.438	99.9	51.3	2121	2067	65400	31.6	260
4v-2:7c	0.438	99.7	51.3	2125	2067	61200	29.6	360
6v-1:7a	0.443	100.0	51.3	2143	2067	51200	24.8	55
6v-1:7b	0.434	98.8	51.3	2125	2067	60800	29.4	260
6v-1:7c	0.432	98.1	51.3	2131	2067	65400	31.6	360
6v-2:6a	0.439	99.7	51.3	2130	2067	51700	25.0	55
6v-2:6b	0.437	99.8	51.2	2127	2059	60500	29.4	260
6v-2:6c	0.430	99.1	51.0	2124	2043	63200	30.9	360
6v-2:7a	0.441	99.8	51.3	2138	2067	50700	24.5	55
6v-2:7b	0.438	99.7	51.2	2134	2059	60300	29.3	260
6v-2:7c	0.433	99.9	51.0	2122	2043	63400	31.0	360

a) cylindern hade en synlig spricka

**Appendix D.3: Spräckprov, horisontella cylindrar. Block 7 är referensblock.**

Cylinderprotokoll				
Gjutning: 2002-09-09		Provning: 2003-03-11 (block 3), 2003-05-19 (block 4 och 6)		
Önskad medel-kub hållfasthet: 47[MPa] vid 28 dygn				
Cylinder	Cylinderhöjd	Densitet	Spräck-hållfasthet	Medel-höjd
[nr]	[mm]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[MPa]	[mm]
7-2:4a	105	2130	3.2	350
7-2:4b	105	2130	3.0	350
7-2:4c	105	2130	2.8	350
7-4:4a	105	2130	2.8	200
7-4:4b	105	2140	2.8	200
7-4:4c	105	2130	2.8	200
7-6:4a	104	2130	3.4	50
7-6:4b	105	2130	3.0	50
7-6:4c	105	2130	2.6	50
3-2:5a	102	2140	2.8	350
3-2:5b	102	2130	3.0	350
3-2:5c	98	2120	2.8	350
3-3:3a	106	2110	1.4	275
3-3:4a	97	2120	2.0	275
3-3:4b	100	2120	2.4	275
3-4:6a	104	2120	3.2	200
3-4:6b	105	2120	2.4	200
3-4:6c	106	2140	2.4	200
3-5:5a	104	2130	2.0	125
3-5:8a	105	2130	2.2	125
3-5:8b	103	2120	2.8	125
3-6:3a	105	2100	1.4	50
3-6:3b	104	2100	2.8	50
3-6:6a	105	2120	3.0	50
4-2:6a	105	2180	2.8	350
4-2:6b	106	2170	2.0	350
4-2:7	105	2190	3.0	350
4-4:7a	105	2160	3.0	200
4-4:7b	105	2170	2.8	200
4-4:7c	105	2160	2.4	200
4-6:6a	105	2170	2.6	50
4-6:6b	105	2170	2.4	50
4-6:6c	105	2170	2.6	50
6-2:6	105	2190	2.8	350
6-2:8a	105	2180	2.8	350
6-2:8b	105	2180	2.8	350
6-4:6a	105	2200	2.8	200



6-4:6b	103	2170	2.6	200
6-4:6c	105	2160	2.2	200
6-6:6a	105	2160	2.6	50
6-6:6b	105	2160	2.6	50
6-6:6c	105	2160	2.0	50
6-4:7a <sup>a</sup>	104	2170	3.0	200
6-4:7b <sup>a</sup>	105	2170	2.6	200
6-4:8 <sup>a</sup>	105	2180	2.8	200
6-6:7a <sup>a</sup>	105	2160	2.8	50
6-6:7b <sup>a</sup>	105	2160	3.0	50
6-6:7c <sup>a</sup>	105	2150	2.4	50

a) spräckprov utförd vinkelrät den globala sprickan

**Appendix D.4: Spräckprov, vertikala cylindrar. Block 7 är referensblock.**

Cylinderprotokoll				
Gjutning: 2002-09-09		Provning: 2003-03-11 (block 3), 2003-05-19 (7v-2:5, 7v-2:6 och 7v-2:7)		
Önskad medel-kub hållfasthet: 47[MPa] vid 28 dygn				
Cylinder	Höjd	Densitet	Spräck-hållfasthet	Medel-höjd
[nr]	[mm]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[MPa]	[mm]
7v-3:3a	105	2140	3.2	90
7v-3:3b	105	2130	2.8	190
7v-3:3c	105	2130	3.0	290
7v-3:5a	105	2130	3.2	90
7v-3:5b	105	2120	3.2	190
7v-3:5c	105	2130	3.2	290
7v-3:7a	106	2130	2.8	90
7v-3:7b	105	2120	3.0	190
7v-3:7c	105	2120	2.8	290
7v-2:5a	105	2160	2.8	230
7v-2:5b	105	2160	2.8	330
7v-2:6a	106	2160	2.8	230
7v-2:6b	105	2160	2.8	330
7v-2:7a	105	2160	2.6	230
7v-2:7b	105	2160	2.6	330
3v-1:4a	104	2130	3.4	90
3v-1:4b	105	2130	2.6	260
3v-1:4c	105	2130	3.2	360
3v-2:5a	106	2140	2.8	90
3v-2:5b	105	2130	3.0	260
3v-2:5c	105	2130	2.8	360
3v-3:6a	105	2130	3.0	90
3v-3:6b	104	2130	3.2	260
3v-3:6c	105	2120	3.4	360