LUND UNIVERSITY

Sprickbildning i puts på isolering : inledande laboratorieförsök och parameterstudier

Hassanzadeh, Manouchehr

2001

Link to publication

Citation for published version (APA):
Hassanzadeh, M. (2001). *Sprickbildning i puts på isolering : inledande laboratorieförsök och parameterstudier*. (Rapport TVBM; Vol. 3099). Avd Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola.

Total number of authors:
1

General rights
Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:
Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.
• Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
• You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
• You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: https://creativecommons.org/licenses/

Take down policy
If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117
221 00 Lund
+46 46-222 00 00

Download date: 25. Apr. 2024

LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA
LUNDS UNIVERSITET

Avd Byggnadsmaterial

SPRICKBILDNING I PUTS PÅ ISOLERING

Inledande laboratorieförsök och parameter-studier

Manouchehr Hassanzadeh

Rapport TVBM-3099 Lund 2001

LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA
LUNDS UNIVERSITET

Avd Byggnadsmaterial

SPRICKBILDNING I PUTS PÅ ISOLERING
Inledande laboratorieförsök och parameter-studier

Manouchehr Hassanzadeh

Rapport TVBM-3099 Lund 2001

ISRN: LUTVDG/TVBM--01/3099--SE (1-41)

ISSN: 0348-7911 TVBM

Lunds Tekniska Högskola
Byggnadsmaterial
Box 118

221 00 LUND

Tel: 046-2227415
Fax: 046-2224427
www.byggnadsmaterial.lth.se

FÖRORD

I en tidigare probleminventering gällande putsade fasader, BESTÄNDIGHET HOS FASADER (Sandin 1998), konstaterades att sprickbildning i puts på isolering ansågs vara det dominerande problemet. Med utgångspunkt från denna inventering utarbetades ett forskningsprogram innefattande litteraturstudier, datorberäkningar, laboratorieundersökningar samt fullskaleförsök. De olika delarna redovisas i separata delrapporter.

Denna rapport avser redovisning av de inledande teoretiska parameterstudier som hittills har genomförts inom SBUF-proj 8106 "**Beständighet hos putsade fasader**". Syftet med parameterstudierna är att skapa en grov uppfattning om hur olika faktorer påverkar sprickbildning i puts på isolering samt ligga till grund för laboratorieprovningar och småskaliga fullskaleförsök. Parameterstudierna genomförs med materialdata som tas fram genom litteraturstudier samt småskaliga provningar.

Projektet genomförs i samarbete med FASADEX och INTEROC FASAD AB i Malmö. Projektet finansieras av OPTIROC och Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond, SBUF.

Lund i mars 2001

Manouchehr Hassanzadeh

SAMMANFATTNING

Sprickor i puts, som är utförd på ett eftergivligt underlag, uppstår då putsens rörelser orsakade av temperatur- och fuktförändringar förhindras. Erfarenheten visar att sprickorna uppkommer kort tid, någon månad, efter appliceringen. Sprickor kan uppkomma lite varstans på en putsad yta. Sprickor kan uppstå i anslutning till fasadöppningar (fönster och dörrar), hörn, anslutning till tak samt mitt på en gavel långt ifrån fönster och hörn.

I denna rapport beskrivs några av de mekanismer som kan leda till sprickbildning. Rapporten behandlar enbart de fuktrelaterade mekanismerna. Samma mekanismer kan även relateras till temperaturrörelser. Det som förorsakar sprickor är förhindrade rörelser hos putsen.

I rapporten presenteras både experimentellt och teoretiskt arbete. Det experimentella arbetet består av två typer av laboratorieförsök. Den ena typen handlar om laboratoriesimulering av sprickbildning hos puts som förhindras att krympa samt fri krympning hos puts. Den andra typen av försök handlar om bestämning av putsens mekaniska egenskaper, d.v.s. indata till beräkningarna. Beräkningarna har utförts med datorprogrammet DIANA, som är ett kommersiellt datorprogram. Detta program innehåller ett antal modeller för beräkning av brottförlopp hos strukturer. Vid beräkningarna har antagits jämn krympning över putsens yta och genom putsens tvärsnitt.

I denna rapport jämförs försöksresultaten med beräkningarna för att verifiera datorprogrammets möjligheter att kunna förutse sprickbildning i puts. Därefter utförs beräkningar med varierande mekaniska egenskaper hos puts för att ta reda på de olika egenskapernas inverkan på sprickbildningen. Följande slutsatser har dragits med hjälp av denna undersökning.

- Försöksresultaten och beräkningarna visar att grunden för uppsprickning av den putskvalitet som användes vid denna undersökning läggs redan vid den tidiga åldern. Sedan är det en tidsfråga innan sprickorna utvecklas och blir synliga.

- Ökning av putsens draghållfasthet har inte så stor inverkan på sprickbildningen. Beträffande sprickbildningen har minskning hos putsens elasticitetsmodul samma inverkan som ökning av putsens draghållfasthet.

- Ökning av putsens brottseghet har stor inverkan på sprickbildningen. Inverkan blir större om elasticitetsmodulen minskar med bibehållen draghållfasthet. Nät- och fiberarmerad puts är därför bra lösningar när det gäller att förebygga sprickbildningar.

- Överstämmelsen mellan försöksresultaten och beräkningarna är god.

SUMMARY

Renderings applied on soft beds, which are made of insulation materials such as mineral wool and cellular plastic, cracks due to restrained thermal and moisture deformations. Field observations show that cracks become visible shortly, few month, after application of the rendering. Cracks occurs everywhere on the surface of the rendering. Cracks usually are observed in areas with stress concentration such as corners of windows and doors, corners of the structure, in vicinity of the roof structure, and in the middle of gable far from the corners and doors.

This report describes some mechanisms which lead to crack development in renderings on soft beds. The report only deals with the mechanisms related to the moisture deformations of the rendering. Since cracking is caused by restrained deformations the conclusions are also valid in the case of restrained thermal deformations.

The report presents both experimental and theoretical results. The experiments include both simulation of crack development in rendering caused by shrinkage and determination of the mechanical properties which are needed for theoretical simulations of the crack development. The theoretical simulations are performed by means of Finite-Element-Method, FEM. The DIANA computer program has been utilized for the numerical simulations.

The results of the numerical simulations are compared with the experiments. The conclusions are as follow:

- As far as the rendering which is used in this investigation is concerned the cracks initiate at an early age. They are not visible at the beginning but it is a matter of time before they become visible.

- The results show that increased tensile strength doesn't have any considerable effects on the cracking behaviour of the rendering. As far as the stiffness of the rendering is concerned decreased stiffness show the same effects as increased tensile strength.

- Toughness has great influence on the crack development in renderings. Increased toughness in combination with decreased stiffness hampers the crack development.

- There is god agreement between experiments and the numerical simulations of the crack development.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1	INLEDNING	9
2	LABORATORIEFÖRSÖK	13
2.1	Laboratoriesimulering av sprickbildning och fri krympning hos puts	13
2.2	Putsens mekaniska egenskaper	17
2.2.1	Teoretisk bakgrund	17
2.2.2	Materialdata	22
3	NUMERISK SIMULERING AV SPRICKBILDNING HOS PUTS	25
3.1	Indata till beräkningsprogrammet	25
3.2	Beräkningsresultat	28
4	JÄMFÖRELSE MELLAN FÖRSÖK OCH NUMERISK SIMULERING	35
5	SLUTSATSER	37
6	FORTSATTA ARBETEN	39
	REFERENSER	41

1 INLEDNING

Sprickor i puts, som är utförd på ett eftergivligt underlag, uppstår då putsens rörelser orsakade av temperatur- och fuktförändringar förhindras. Erfarenheten visar att sprickorna uppkommer kort tid, mindre än någon månad, efter appliceringen. Sprickor kan uppkomma lite varstans på en putsad yta. Sprickor kan uppstå i anslutning till fasadöppningar (fönster och dörrar), hörn, anslutning till tak samt mitt på en gavel långt ifrån fönster och hörn. I figur 1 visas exempel på sprickbildning i puts utförd på ett eftergivligt underlag.

Sprickor uppstår på grund av förhindrade fukt- och temperaturrörelser. Nedan beskrivs några av de mekanismer som kan leda till sprickbildning. Mekanismer som beskrivs är fuktrelaterade. Samma mekanismer kan även relateras till temperaturrörelser.

I figur 2a och 2c visas en putsad yta och dess tvärsnitt. Om pusten torkar jämnt, d.v.s. att fukthalten inte varierar över ytan och genom tvärsnittet, uppstår inga spänningar i putsen. Det förutsätts dock att inget tvång förekommer. Tvång medför att dragspänningar uppstår vilken kan leda till sprickbildning om spänningarna överstiger putsens draghållfasthet. Tvång kan delas in i två grupper, nämligen yttre respektive inre tvång. Som exempel på yttre tvång kan nämnas infästningar av olika slag samt detaljer på fasadens yta som förhindrar putsens rörelser. Inre tvång förorsakas av ojämn uttorkning av putsen. Ojämn uttorkning kan förekomma både över putsens yta och genom putsens tvärsnitt. Inre tvång förorsakas även av ojämnt armeringsdjup, figur 2h.

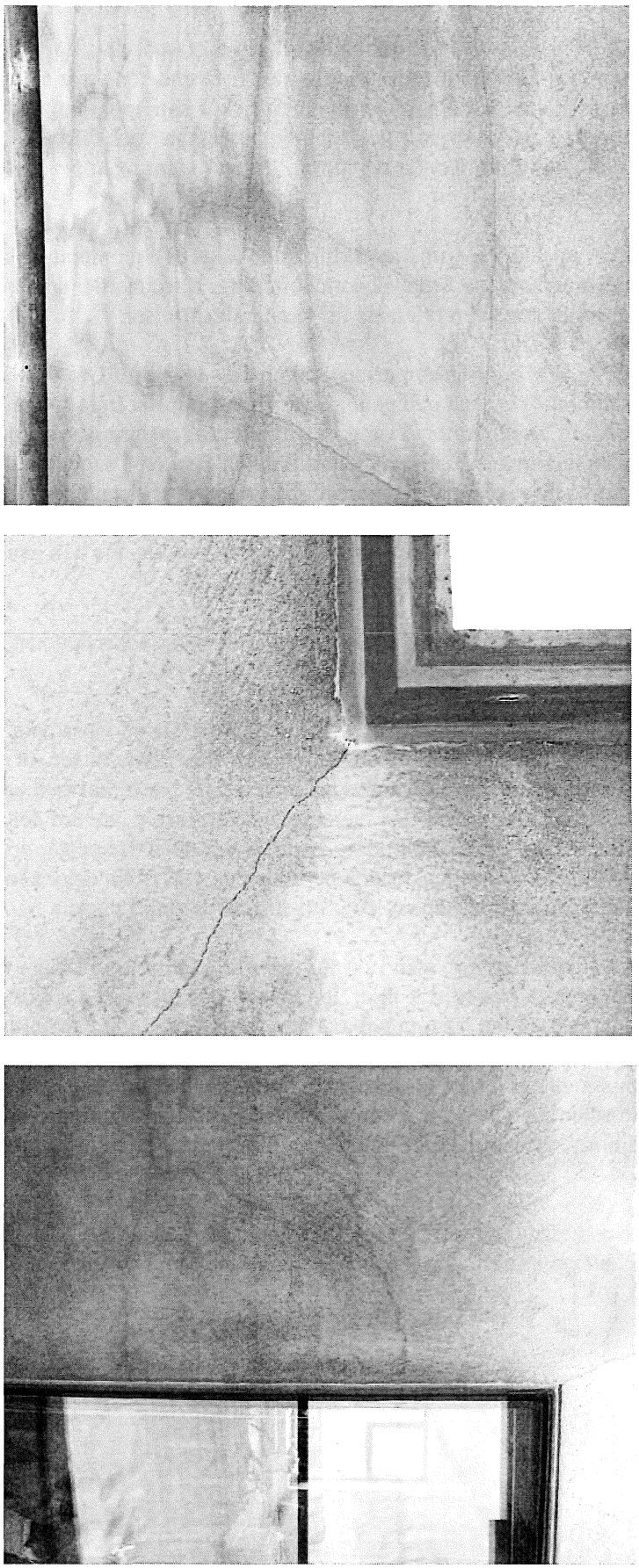
Även hörn och öppningar, för fönster och dörrar, på fasaden kan betecknas som tvång eftersom putsens rörelser störs av dessa detaljer, figur3.

Fasader har normalt stora ytor, vilken kan medföra att vissa delar kan torka ut snabbare än övriga delar. I figur 2b och d visas en putsad yta och dess tvärsnitt som är utsatt för en ojämn uttorkning, den markerade delen som visas med heldragen linje har torkat snabbare. Den streckade linjen visar den position som randen hos den markerade delen skulle inta om den fick krympa fritt. Eftersom den markerade delens rörelser förhindras av de övriga delarna uppstår dragspänningar mellan dessa delar. Vid stor skillnad i uttorkningshastighet mellan en ytas olika delar kan dragspänningarna överskrida materialets draghållfasthet, vilken leder till sprickbildning i putsen.

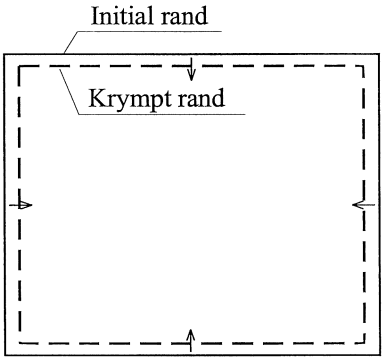
Ojämn fuktfördelning, som i sin tur leder till ojämn fördelning av krympningen, kan även förekomma genom putsens tvärsnitt. I figur 2e visas ett putstvärsnitt hos vilket den övre delen har torkats snabbare än den undre delen. Denna typ av ojämn fuktfördelning, här förutsätts att inga andra tvångskrafter förekommer, leder till utböjning/inböjning av putsen. Om fuktfördelningen och den resulterande krympningen är linjärt fördelade genom tvärsnittet uppstår inga spänningar i putsen. Vid annan typ av fuktfördelning och vid förekomst av tvång uppstår spänningar i putsen. Som exempel kan nämnas att utböjning/inböjning enligt figur 2e kan förhindras av infästningar eller av övriga delar av putsen, figur 2f.

Även armerad puts spricker om fuktrörelserna förhindras. När putsen spricker överförs krafterna över sprickan via armeringen. Om armeringen inte ligger på samma djup överallt, d.v.s. den är vågformad,

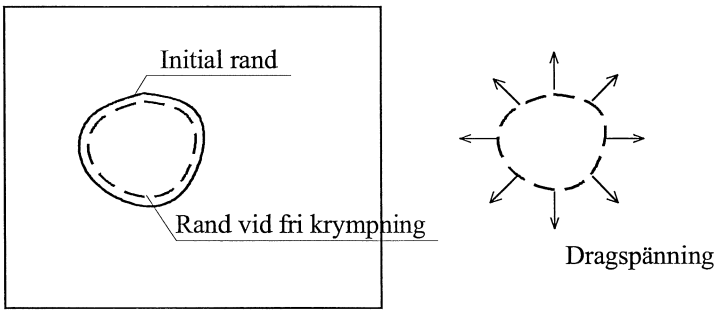
Figur 1 *Sprickbildning hos puts utförd på ett eftergivligt underlag.*



Putsplan

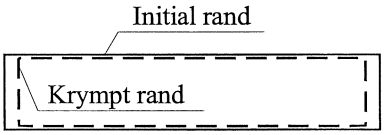


a) Jämn krympning

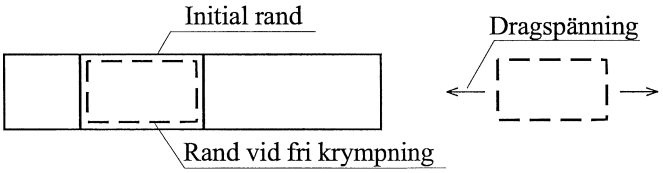


b) Ojämn krympning med tillhörande spänningsbild

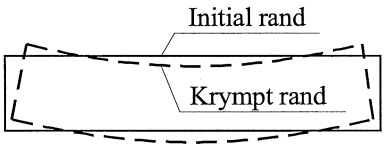
Putstvärsnitt



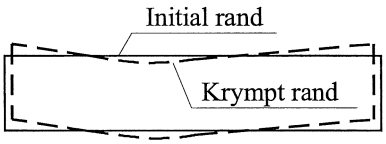
c) Jämn krympning



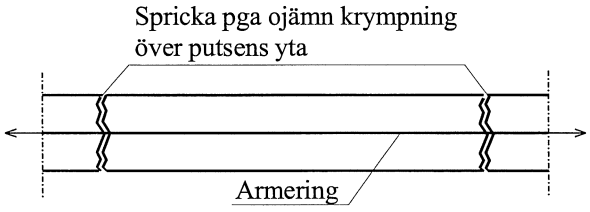
d) Ojämn krympning med tillhörande spänningsbild



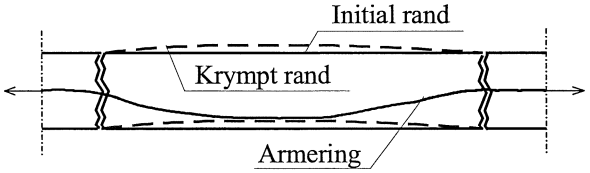
e) Ojämn krympning genom tvärsnittet



f) Ojämn krympning genom tvärsnittet och över ytan

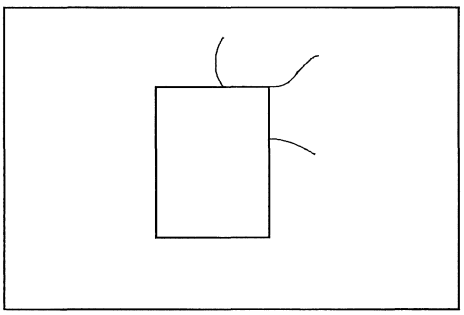


g) Jämn krympning genom tvärsnittet och ojämn krympning över putsytan, rak armering.



h) Jämn krympning genom tvärsnittet och ojämn krympning över putsytan, böjd armering.

Figur 2 Exempel på konsekvenser av putsens krympning



Figur 3 Exempel på sprickbildning vid öppningar i fasaden.

uppstår även uttryckning/intryckning av delar av putsen, figur 2g och 2h. Denna mekanism kan vara speciellt viktigt när det gäller ojämn uttorkning av putsen.

Nedan redovisas resultaten av laboratorieförsök och beräkningar gällande sprickbildning på puts som utsätts för förhindrad krympning. Först presenteras försöken och därefter redovisas beräkningsresultaten.

2 LABORATORIEFÖRSÖK

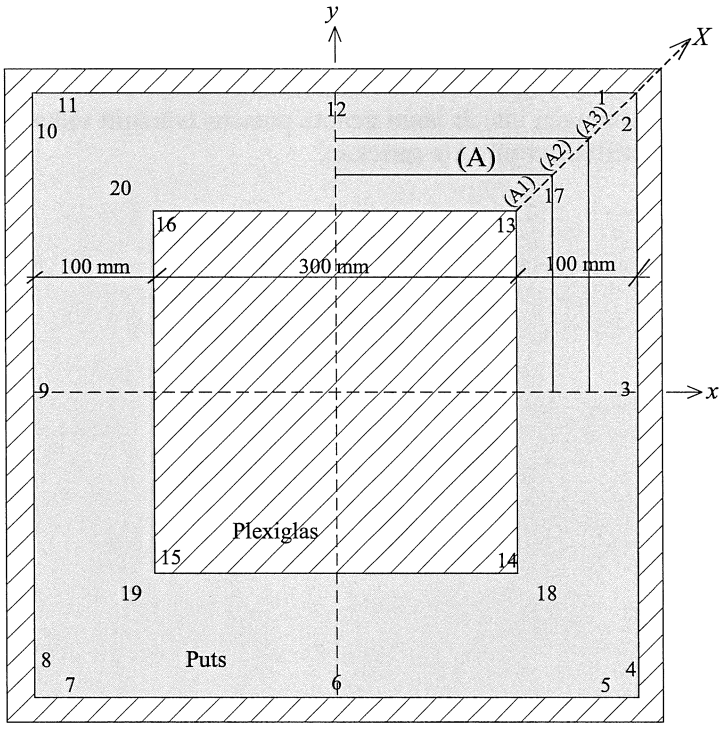
Nedan redovisas två typer av laboratorieförsök. Den ena handlar om laboratoriesimulering av sprickbildning hos puts som förhindras att krympa samt fri krympning hos puts. Den andra handlar om bestämning av putsens mekaniska egenskaper. I denna rapport ges en kortfattad presentation av provningsmetoderna samt en begränsad del av mätresultaten. En fullständig redovisning kommer att ges i en separat rapport.

2.1 Laboratoriesimulering av sprickbildning och fri krympning hos puts

Samtliga resultat som redovisas här är baserade på mätningar utförda av Kenneth Sandin. Resultaten presenteras översiktligt med syfte att kunna verifiera beräkningsresultaten.

I figur 4 visas försöksuppställning för simulering av sprickbildning hos puts. Putsen göts kring en 300x300x12 mm skiva i en 500x500 mm plexiglasform. Putsens tjocklek var 12 mm. Syftet med skivan i mitten var att förhindra putsens krymprörelser. Förhindrade krymprörelser skulle då leda till sprickbildning vid hörnen av den inre skivan.

I figuren är 20 punkter, 1 – 20, markerade. Vid punkt 1 – 12 bestämdes avståndet mellan putsen och formens inre kant. Vid punkt 13 – 16 bestämdes sprickvidden vid hörnet. Vid punkt 17 – 20 bestämdes avståndet mellan hörnen och den punkt där sprickvidden var 0.020 mm.



Figur 4 Försöksuppställning för laboratoriesimulering av sprickbildning hos puts.

Putsen täcktes med plastfolie efter avslutad tillverkning. Ett dygn senare avtäcktes putsen och fick avge fukt till laboratorieluften. Putsens krympning och sprickbildning mättes vid avtäckningen samt därefter vid olika tillfällen, närmare bestämt 2, 3, 4, 7 och 53 dygn efter tillverkning.

Enbart en putskvalitet användes, ett kommersiellt KC-bruk avsett till puts på isolering. Två provkroppar göts, en med nätarmering och en utan. Nätarmeringen utgjordes av stålnät med 20 mm maskvidd och 1 mm tråddiameter.

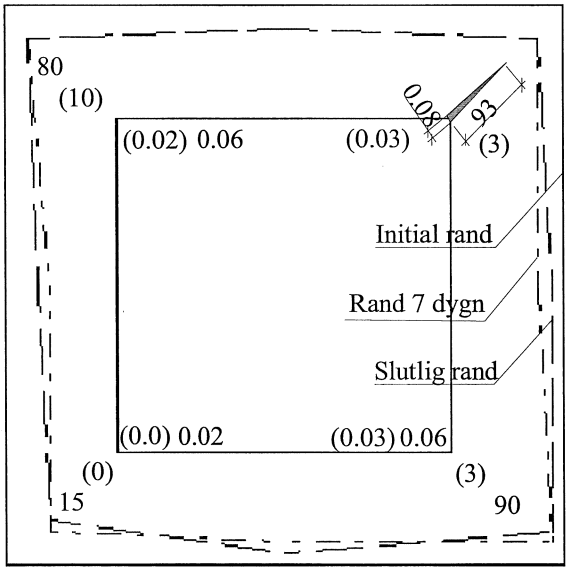
I figur 5 har deformationerna i punkt 1 – 12 ritats. Deformationerna har förstorats med faktorn 200. Figur 5a och 5b visar deformationerna hos puts med armering medan figur 5c och 5d visar deformationerna hos puts utan armering. Den heldragna ramen som är benämnd "Initial rand", i figur 5a och 5c, visar startläget medan den streckade respektive streckprickade linjerna visar randens slutläge respektive läge vid 7 dygn. I figur 5b och 5d visas ramens läge vid 2, 3 och 4 dygn. I figuren visas även sprickvidden vid respektive hörn, punkt 13 – 16, och sprickans längd, se övre högra hörnet i figur 5a. De värden som anges inom parentes är mätvärden 7 dygn efter tillverkning medan siffror utan parentes är slutvärden d.v.s. 53 dygn efter tillverkning.

Figurerna visar inte sprickornas läge och riktning. Sprickorna initieras vid de inre hörnen och sedan växer mot de yttre hörnen. De når inte ända fram till de yttre hörnen utan viker de av något. En del av sprickor slutar att växa. Detta gäller samtliga sprickor utom sprickan i det övre vänstra hörnet hos den oarmerade putsen. Med spricka menas här en spricka som är större är 0.02 mm. Nedanstående tabell visar de kontroll som utförts med avseende på sprickornas synbarhet.

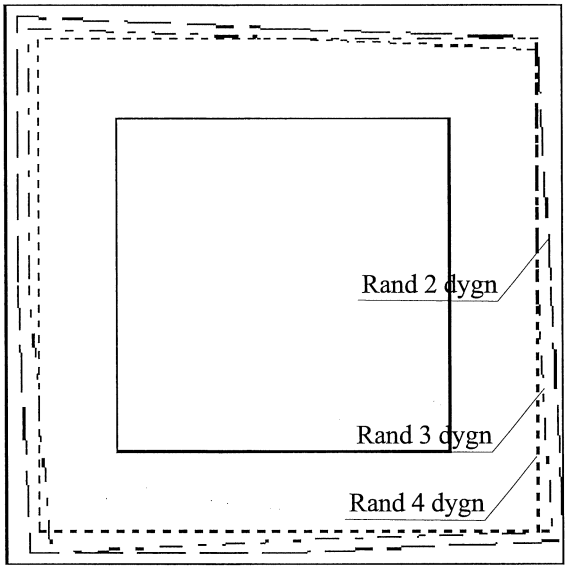
Tabell 1 Sprickornas synbarhet, Kenneth Sandin.

Sprickvidd, mm	Utan hjälpmedel	Lupp 2x förstoring	Lupp 4x förstoring	Sprickmikroskop 40x förstoring
0.10	Ja	Ja	Ja	Mätbar
0.05	Nej	Ja	Ja	Mätbar
0.02	Nej	Nej	Nej	Mätbar

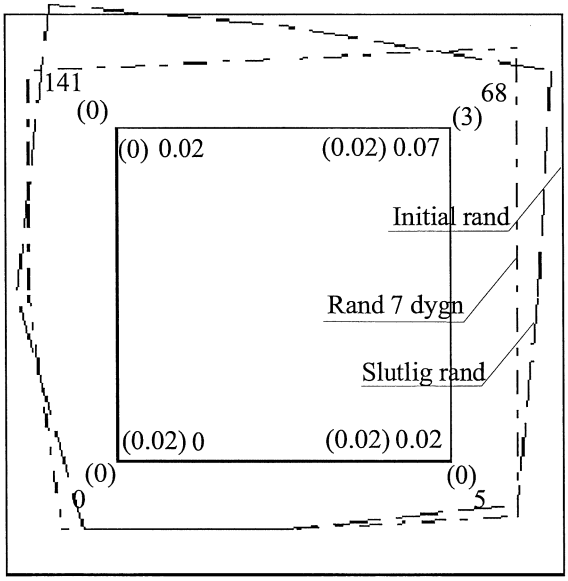
Av figurerna framgår, dessutom, att de för ögat synliga sprickorna inte uppträder under de första 7 dygnen, trots att stor del av krympningen redan har inträffat, se nedan. Orsaken till detta är inte känd men det kan bero på att krympningen inte är jämn genom putsens tvärsnitt vilken kan ha lett till kantlyftning. Kantlyftningen kan tillfälligt tillsluta sprickan.



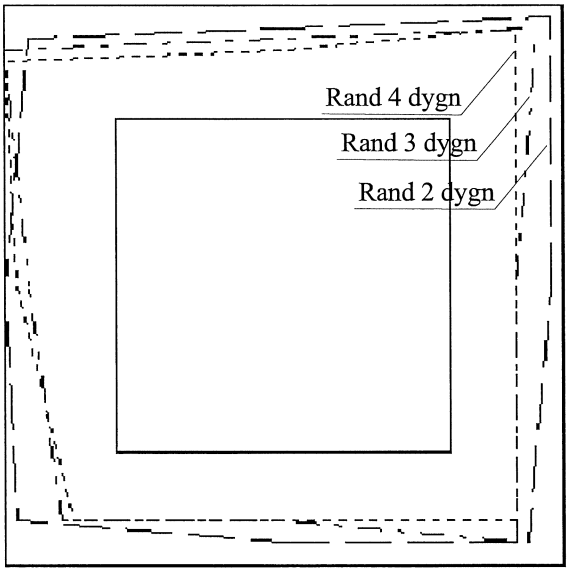
(a) Deformation och sprickbildning hos armerad puts vid 7 dygn och slutet av mätningar (53 d).



(b) Deformation hos armerad puts vid 2, 3 och 4 dygn.



(c) Deformation och sprickbildning hos oarmerad puts vid 7 dygn och slutet av mätningar (53 d).

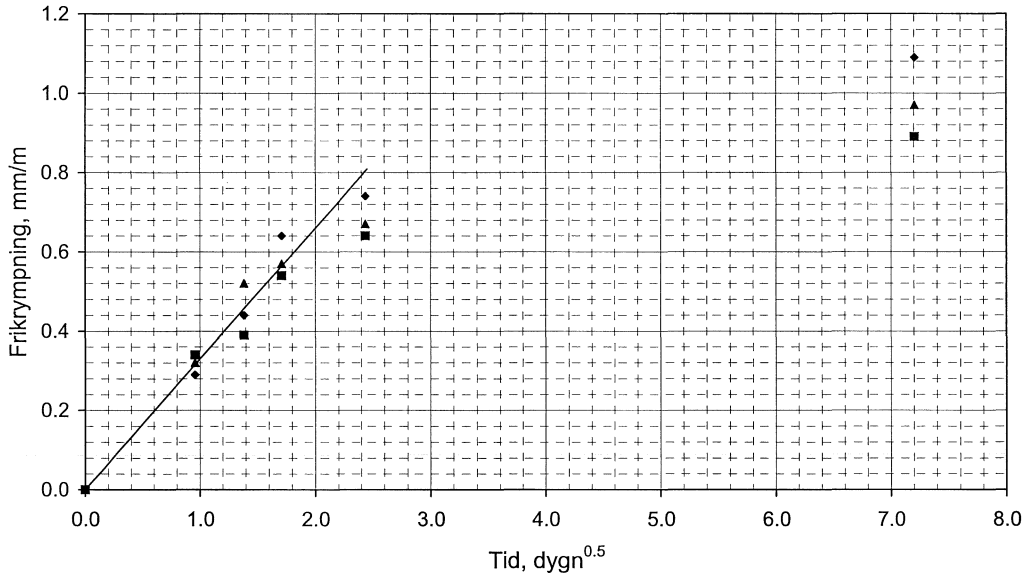


(d) Deformation hos oarmerad puts vid 2, 3 och 4 dygn.

Figur 5 Deformation och sprickbildning hos puts.

För att bestämma putsens fria krympning göts även 3 stycken 500x50x12 mm plattor. Deformationerna hos dessa stavar mättes vid samma tillfällen som ovan. Stavarna göts i en plexiglasform och täcktes med plastfolie efter tillverkningen.

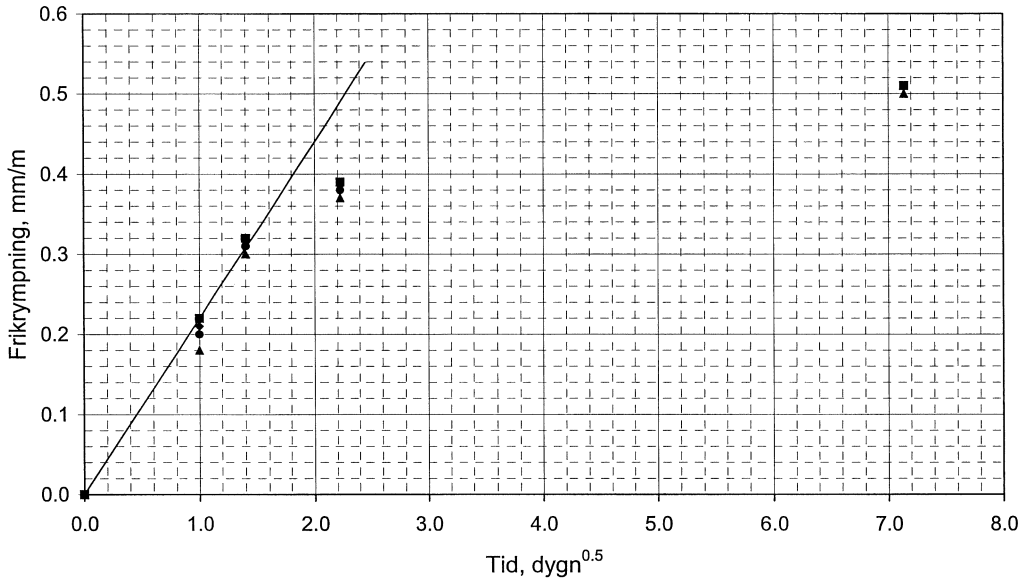
Resultaten framgår av figur 6. Krympningen är nollställd med den första mätningen som genomfördes efter avtäckningen. Som framgår av figuren inträffar ca 75% av krympningen inom de första 7 dygnen.



Figur 6 Krympning hos provstavar gjutna i Plexiglasformar.

Ytterligare fyra stycken provstavar, 170x25x25 mm, göts i stålformar. Dessa stavar var försedda med dubbar. Stavarna täcktes med plastfolie efter tillverkningen och avtäcktes två dygn senare. Stavarna placerades vid 33% relativ fuktighet. Den första mätningen av krympning genomfördes två dygn efter tillverkning medan de efterföljande mätningarna utfördes vid samma tillfällen som ovan.

Resultaten framgår av figur 7. Krympningen är nollställd med den första mätningen som genomfördes två dygn efter tillverkning. Resultaten i figur 6 avviker från resultaten i figur 7. Avvikelsen beror på att mätpunkterna i figurerna är nollställda med första mätningen. Som framgick ovan är tiden för nollställningarna olika. De provkroppar som är gjutna i stålformar har krympt en del vid det första mätningstillfället. Denna krympning kan uppskattas till 0.2 mm/m. Dessutom har man observerat icke återgående fuktrörelser hos plexiglas vilka, vid dessa mätningar, leder till en överskattning av krymprörelserna i de provkroppar som är gjutna i plexiglasformarna. Om hänsyn tas till båda effekterna så minskar skillnaderna mellan resultaten i figur 6 och 7.



Figur 7 Krympning hos provstavar gjutna i stålformar.

2.2 Putsens mekaniska egenskaper

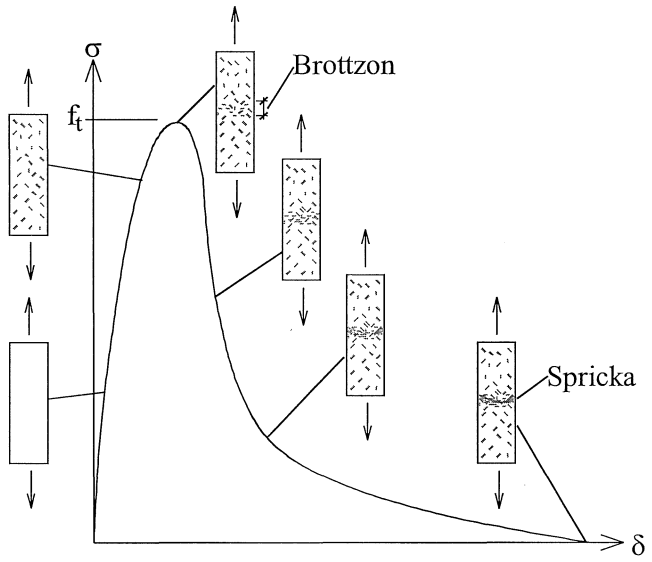
2.2.1 Teoretisk bakgrund

Nedan beskrivs brottförloppet för betong, puts, sten och liknande material som är porösa och spröda material. Beskrivningen är kortfattad. För detaljerad beskrivning hänvisas till Per-Erik Petersson (1981), Kompendium i Byggnadsmateriallära FK, Avdelningen för Byggnadsmaterial.

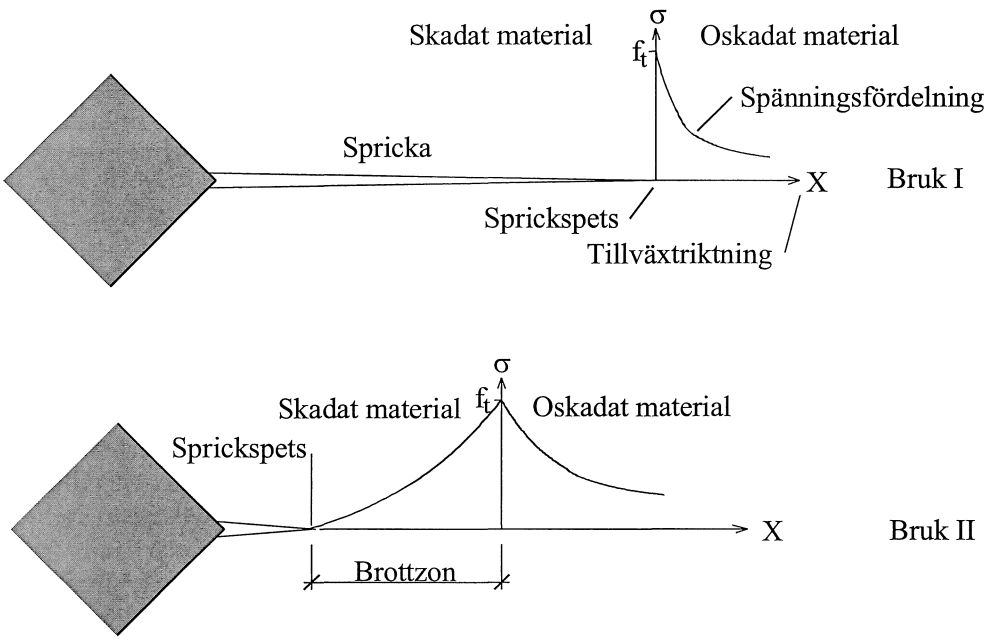
Det slutliga brottet i porösa och spröda material föregås av mikrosprickbildning. Med brott menas att materialet delas i två delar. Mikrosprickor är lokala skador som initieras i de ställen materialet är försvagat och i de ställen där spänningskoncentration förekommer till exempel mellan ballastkorn och bindemedel.

När en provkropp som består av ett sprött material dragbelastas under deformationskontroll, d.v.s. deformationen ökar successivt, ökar dragspänningen med ökad deformation tills materialets draghållfasthet uppnås, se figur 8. Därefter sjunker dragspänningen tills provkroppen går sönder, d.v.s. delas i två delar. Före maxspänningen, f_t, är mikrosprickbildningens omfattning liten och den är fördelad över hela volymen. Vid maxspänning ökar mikrosprickbildning. Mikrosprickbildningen blir också koncentrerad inom ett begränsat område så kallat brottzon. Härefter sker all mikrosprickbildning inom brottzonen. Ökade deformationer leder till ökade antal mikrosprickor samt att mikrosprickorna växer ihop. Det är brottzonen som så småningom utvecklas till den slutliga och synliga sprickan.

Materialet konsumerar energi under mikrosprickbildningen. Ju större energi som materialet konsumerar per deformationsenhet desto segare beter sig materialet. Ett segt material har större möjlighet att omfördela och utjämna spänningskoncentrationer. I figur 9 visas schematiskt spänningsfördelningen framför en spricka i två putsbruk, d.v.s. bruk I och II. Bruken antas ha exakt samma mekaniska egenskaper. Den enda skillnaden mellan bruken är att brott i I inte föregås av mikrosprickbildning, d.v.s. ingen energi konsumeras under brottprocessen. Bruken krymper och krympningen förhindras av det hörn som visas i figuren. Den fria krympningen respektive krympningens utveckling med tiden antas vara lika hos båda bruken.



Figur 8 Utveckling av mikrosprickor.

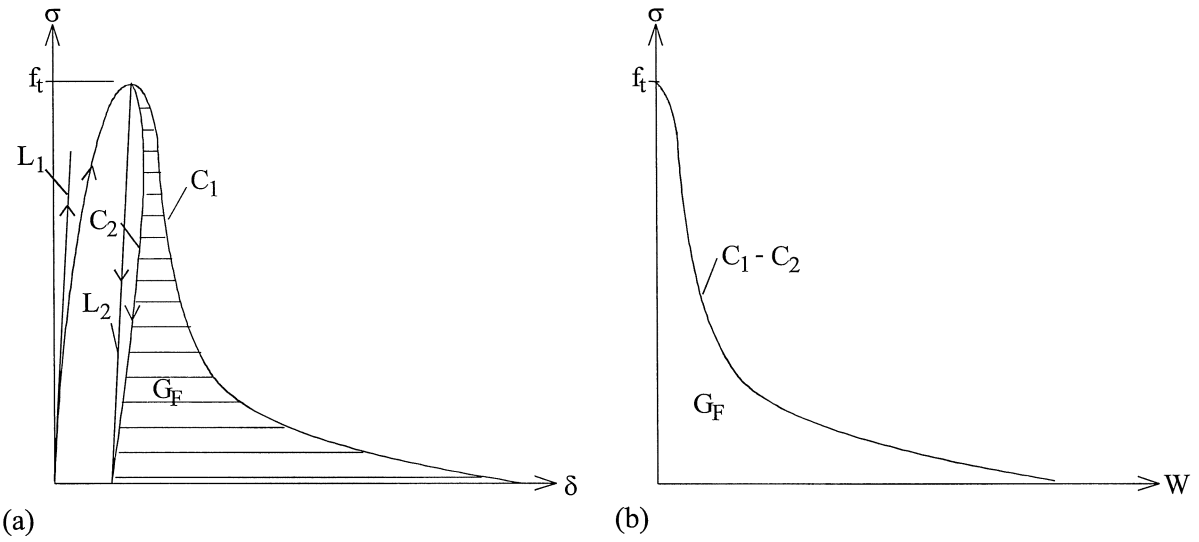


Figur 9 Spänningsfördelning framför en spricka.

När krympningen förhindras utvecklas sprickor som växer med ökad krympning. Figuren visar spänningsfördelningen vid en tidpunkt då den fria krympningen är lika stor i båda bruken. Det framgår av figuren att sprickan i puts I vuxit mer än sprickan i puts II. Vid sprickspetsen är spänningen hög för I medan den är låg för II. Ytterligare ökning av krympning leder till spricktillväxt som går längre i I än i II.

Den zon som bildas framför en verklig spricka kallas för brottzon. Egenskaperna hos denna zon beskrivs med en spänning – deformationskurva. Denna kurva bestäms genom ett deformationsstyrt dragprov. Resultatet av ett sådant dragprov kan se ut som kurva C1 i figur 10a. Från kurvan erhålls brott-

zonens spänning – deformationskurva genom att subtrahera kurva C2 från kurva C1. Resultatet av subtraktionen visas i figur 10b. Denna kurva beskriver brottzonens spänning – deformationskurva, σ-W kurva. Kurva C2 är provkroppens avlastningskurva vid maxspänning. C2 bestäms inte i praktiken. Linje L2 som är parallell med linje L1, tangenten till kurva C1 vid origo, används istället för C2.



Figur 10 Bestämning av brottzonens spänning - deformationskurva.

Ytan under σ-W kurva är den brottenergi , G_F [N/m],som konsumeras per ytenhet när en spricka bildas.

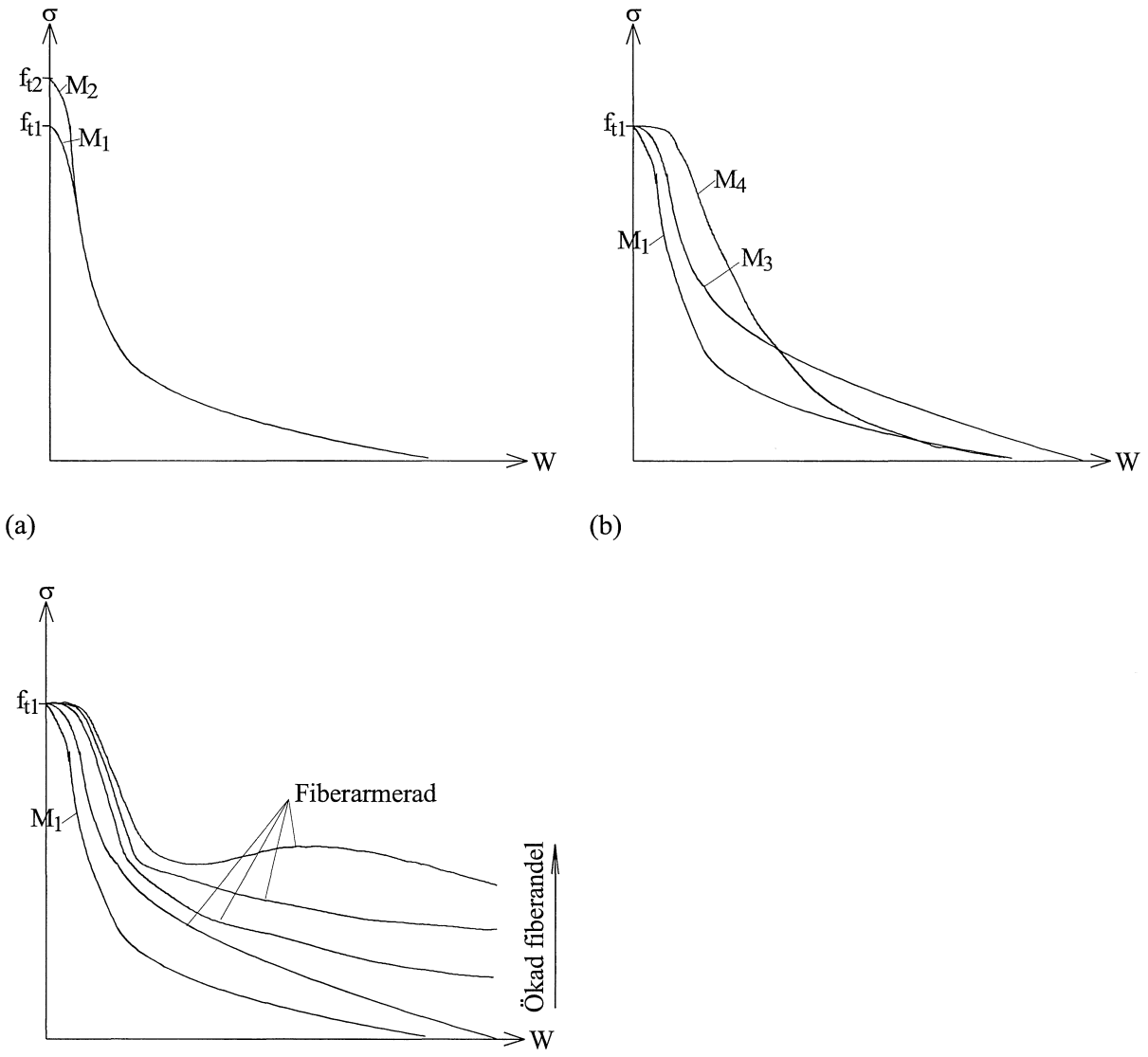
I figur 11 jämförs några typer av σ-W kurvor. I figur 11a jämförs material M1 och M2. Material M1 har lägre draghållfasthet och brottenergi jämfört med material M2. Material M2,s beteende vid brott är sprödare än M1. Det vill säga hög brottenergi behöver inte leda till segare brottegenskaper. De faktorer som är viktiga är:

- Brotzonens storlek i förhållande till konstruktionens karakteristiska storlek.
- Den energi som frigörs i samband med spricktillväxt i förhållande till den energi som förbrukas i samband med sprickbildning.
- σ-W kurvans form.

Faktorernas inverkan beskrivs nedan.

I figur 11b jämförs material M1 med material M3 och M4. Bland dessa material beter sig M4 segast vid brott. Anledningen är kurvans lutning. Ju brantare kurvan är desto sprödare beter sig materialet. Vid konstant draghållfasthet leder ökning av brottenergi till ökad flackhet hos σ-W kurvan vilken ökar materialets seghet.

När man tillsätter fibrer ökar inte materialets draghållfasthet nämnvärd däremot ökar materialets brottenergi och kurvans flackhet. I figur 11c visas effekten av fibrer.



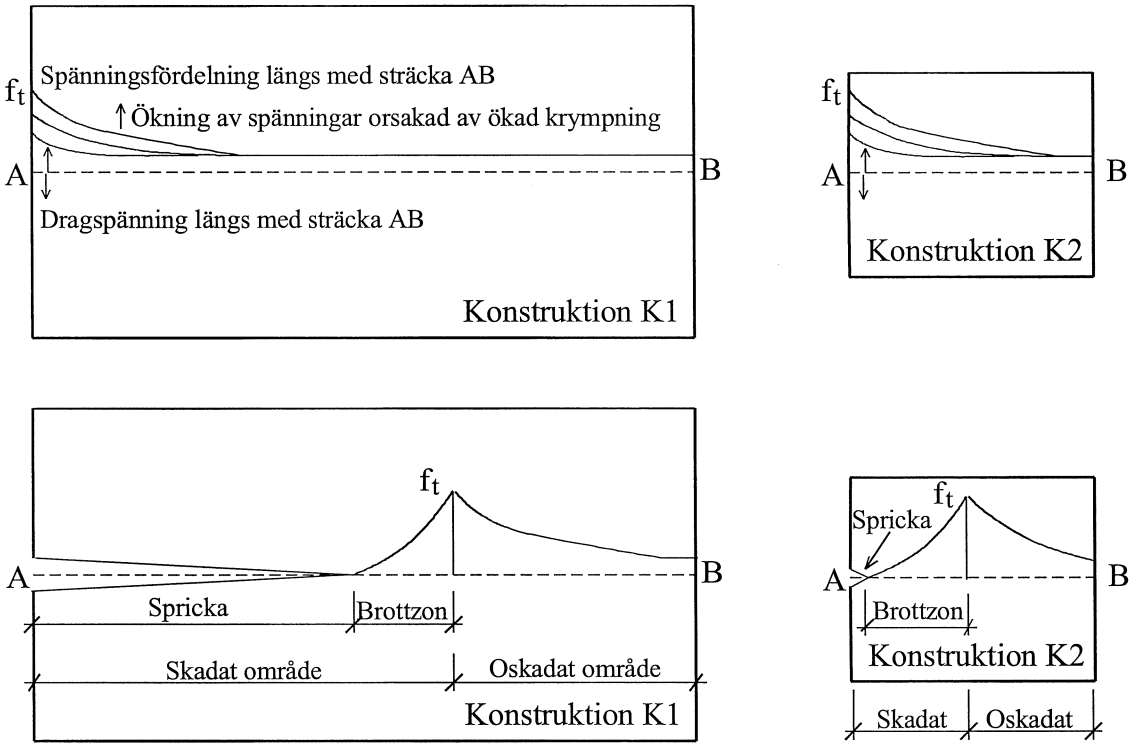
Figur 11 Exempel på olika spänning – deformationskurva för brottzon.

Strax före brott, d.v.s. vid maxspänning, är en del elastisk energi lagrade i materialet. Denna energi kan anges med kf_t^2/E [N/m^2], f_t [N/m^2] är materialets draghållfasthet och E [N/m^2] är materialets elasticitetsmodul. k är en faktor som beror på belastningsfall och provkropps storlek. Vid enaxiellt dragprov är $k = 0.5V$. V [m^3] är provkroppens volym.

Den lagrade energin frigörs i samband med brott. Energin tas om hand av provkroppen genom plastiska deformationer, mikrosprickbildning, brott och dynamiska effekter. Plastiska deformationer i hårdnad puts, betong och liknande material är försumbara. De dynamiska effekterna behandlas inte här och de kan antas vara försumbara när det gäller långsamma brottförlopp. Följaktligen går energin åt mikrospikbildning samt spricktillväxt och brott, d.v.s. sprickan växer genom att använda denna energi. Sprickan växer tills energin är förbrukad. När all energi är förbrukad slutar sprickan att växa. Här förutsätts, dock, att de yttre faktorerna såsom laster, krympning, m.m. förblir oförändrade.

Konstruktionens storlek påverkar också brottbeteendet.
I figur 12 visas delar av två konstruktioner, K1 och K2. Konstruktionerna består av identiskt lika material. K1 är betydligt större än K2. Anta att båda konstruktionerna har blivit utsatta för förhindrad

krympning, att sprickan initieras vid punkt A och sedan fortsätter mot punkt B. Förhindrad krympning medför att dragspänningen vid A ökar. Vid en bestämd krympning uppnås materialets draghållfasthet vid punkt A. Vid detta tillfälle försvagas konstruktionerna lokalt vilken medför att en del av den lagrade energin frigörs. Den frigjorda energin medför att sprickan växer mot B tills energin är förbrukad. Om energin inte är tillräcklig att driva sprickan ända till B slutar den att växa. Härefter, krävs ytterligare krympning för att sprickan skall börja växa igen.



Figur 12 Spricktillväxt i stor respektive liten konstruktion.

När materialets draghållfasthet uppnås bildas en brottzon vilken förbrukar den energi som frigörs. Som framgick ovan är ytan under σ-W kurvan (G_F) den energi som förbrukas. Ju större G_F desto större möjlighet har materialet att bromsa spricktillväxten. Men G_Fs storlek är inte ett tillräckligt villkor för ett stabilt och långsamt spricktillväxt. En stor konstruktion har större volym jämfört med en liten konstruktion. När sprickan växer en längdenhet är energiförbrukningen densamma för båda konstruktionerna medan den frigjorda energin är större i en stor konstruktion.

Som framgick ovan kan materialens seghet eller sprödhet inte jämföras enbart genom att jämföra deras brottenergi. Kurvans form är inte heller praktiskt användbar parameter för denna jämförelse. Det finns en annan parameter för att jämföra olika material med avseende på seghet. Parametern kallas för karakteristisk längd, l_{ch} [m]. l_{ch} jämför i princip den energi som går åt att skapa en ytenhet brottyta med den elastisk energi som är lagrad i en provkropp.

Materialegenskapen karakteristisk längd, l_{ch} [m], är ett mått på spröda materialens seghet.

$$l_{ch} = \frac{E\,G_F}{f_t^2} \quad \text{m}$$

E, N/m^2, är materialets elasticitetsmodul, G_F, N/m, är brottenergi och f_t, N/m^2, är den enaxiella draghållfastheten.

Det bör observeras att l_{ch} är användbar för material som i sitt brottbeteende liknar betong, puts, sten m.m.. Parametern är inte användbar när det gäller metaller och sega plaster. Parametern är inte heller användbar när det gäller att jämföra olika fiberarmerade puts och betong med varandra.

Frågan som man bör ställa sig är att vilken betydelse brottzonens egenskaper har för spricktillväxt i en stor putsad yta. När det gäller oarmerad puts och puts utan fiberinblandning har brottzonens egenskaper försumbara effekter på den putsade ytans brottbeteende. I stora konstruktioner är den energi som frigörs vid en spricktillväxt tillräcklig stor för att kunna driva sprickan ytterliggare en bit utan inverkan av yttre laster eller tilläggsdeformationer. Dessutom är brottzonens längd försumbar i jämförelse med den sträcka som den kommer att vandra, se figur 12. Den utjämningseffekt på spänningsfördelningen och den bärförmåga som brottzonen har blir försumbara när det gäller stora konstruktioner.

Den styrande faktorn när det gäller konstruktioners beteende vid brott är d/l_{ch}, d [m] är konstruktionens karakteristiska storlek, t.ex. balkens höjd vid böjningsbelastning av en balk. När d/l_{ch} är liten, < ca 0.1, beter sig konstruktionen segt. När d/l_{ch} är stor, > ca 6, beter sig konstruktionen sprött. Inverkan av brottzonen kan försummas helt då d/l_{ch} är stor, > ca 10. I en stor och oarmerad putsyta växer sprickan av sig själv när sprickan har vuxit en kritisk sträcka. Denna sträcka är proportionellt mot l_{ch}. Proportionalitetsfaktorn beror på ytans utformning och dimensioner. När den kritiska sprickläng den uppnås växer sprickan ohejdad utan att yttre faktorer såsom belastning eller krympning behöver förändras.

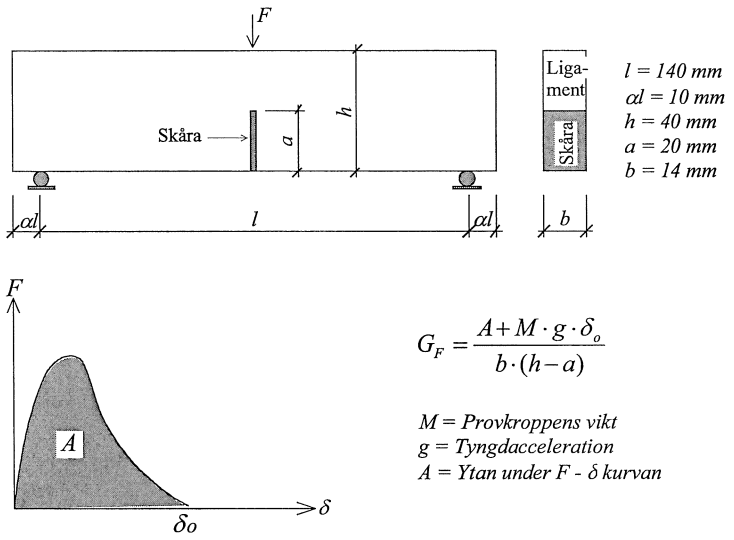
När man tillsätter fibrer i puts ökar putsens brottenergi. Dessutom överbryggar fibrerna sprickan över en större sträcka. Dessa faktorer medför att brottzonen får en större utsträckning med ökade möjligheter att utjämna spänningarna och bidra till bärförmågan. Energiförbrukningen blir så stor att den kan hejda en spricktillväxt. Nätarmering har liknande effekt.

Som framgick ovan har brottzonen ingen inverkan beträffande spricktillväxt i stora putsytor. Varför skall man ta hänsyn till dess egenskaper när man utför beräkningar för oarmerade puts. När man utför laboratorieprovningar använder man provkroppar som är betydligt mindre än i praktiken förekommande putsade ytor. För utvärdering av provningsresultat och överförning av slutsatser till större konstruktioner behöver man en modell som kan beskriva konstruktionsbeteendet på ett realistiskt sätt. En puts som inte uppvisar sprickbildning i en liten skala kan uppvisa sprickbildning i en större skala. Modeller som tar hänsyn till brottzonens egenskaper har större möjligheter att genomföra denna överföring jämfört med andra modeller.

2.2.2 Materialdata

För numerisk simulering av sprickbildning krävs indata. Den indata som behövs för den modell som används här bestäms från putsens kompletta arbetskurva i drag. Eftersom det är svårt att utföra dragprov på puts, bestämdes putsens mekaniska egenskaper genom indirekta metoder, t.ex. putsens draghållfasthet bestämdes genom spräckprov. Nedan redovisas de provningar som har utförts för att bestämma putsens mekaniska egenskaper.

Två trepunktsböjprov utfördes med skårade provstavar 2, 3, 4 och 7 dygn efter tillverkning, totalt 8 prov. Försöksuppställningen framgår av figur 13.



Figur 13 Försöksuppställning för bestämning av putsens brottenergi.

Trepunktsböjprovet utfördes för att bestämma putsens brottenergi (G_F, N/m). Som framgår av figuren är brottenergin lika med det arbete som utförs av kraften F, d.v.s. ytan under last - nedböjningskurvan, och provkroppens vikt dividerat med ligamentets yta, brottytan. Vid varje provningstillfälle utfördes även ett trepunktsböjprov och två spräckprov. Trepunktsböjprovet utfördes med samma provstavar som ovan fast utan skåra. Spräckproven utfördes på halvorna av provstavar som användes vid bestämning av brottenergin. Resultaten framgår av tabell 2. Det bör noteras att värdena för brottenergi och spräckhållfasthet är medelvärdet av två prov.

Tabell 2 Mekaniska egenskaper

Ålder Dygn efter tillverkning	Böjdraghållfasthet MPa	Spräckhållfasthet MPa	Brottenergi N/m
2	1.4	0.6	16
3	1.7	0.8	18
4	2.6	1.0	16
7	2.9	1.0	15

Putsens elasticitetsmodul bestämdes vid ett enda tillfälle, 3 dygn efter tillverkning. Elasticitetsmodulen bestämdes med en icke förstörande provningsmetod, nämligen genom resonansfrekvensmätning. Den elasticitetsmodul som bestäms på detta sätt kallas för dynamisk elasticitetsmodul och är 10% - 20% större än den statiska elasticitetsmodulen. Den dynamiska elasticitetsmodulens värde var 8978 MPa. Den statiska elasticitetsmodulen blir då ca 7800 MPa. Elasticitetsmodulens utveckling med tiden bestämdes inte men den antas att ha samma utveckling som spräckhållfastheten.

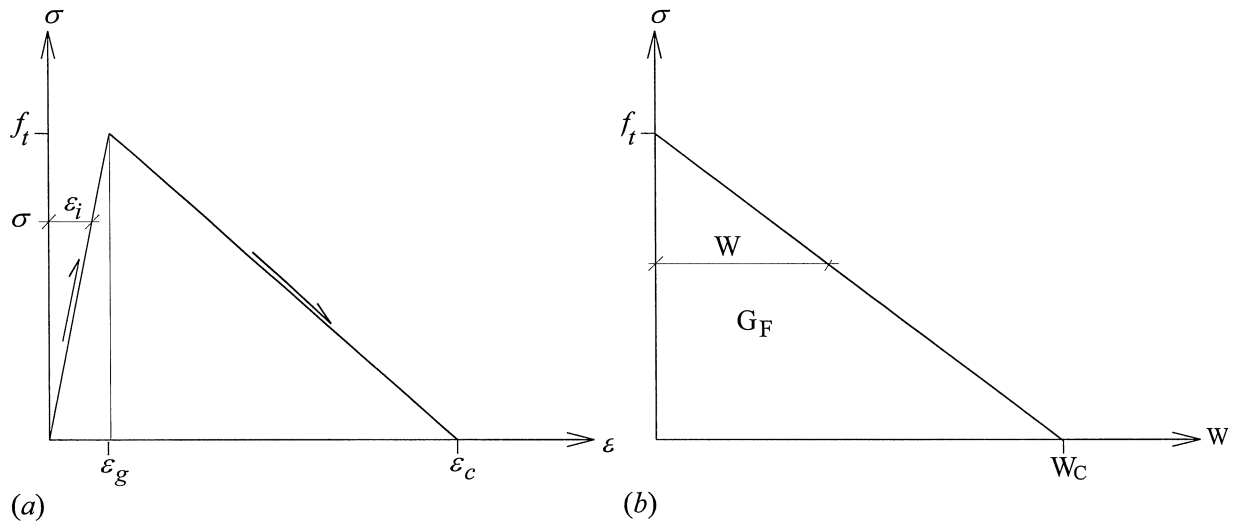
Som framgick ovan kan spröda materialens seghet uttryckas genom materialets karakteristiska längd l_{ch}. Ju större l_{ch} är desto segare är materialet. l_{ch} är av storleksordningen 0.40 m, 0.15 m och 0.05 m för normalbetong, höghållfastbetong och vanligt ballastmaterial. l_{ch} är ca 0.17 m för den aktuella putsen. Vid beräkning av l_{ch} har E, G_F och f_t satts lika med 7800 MPa, 16 N/m och 0.85 MPa. Det har antagits att den enaxiella draghållfastheten är ca 85% av spräckhållfastheten. Den aktuella putsen är betydlig sprödare än vanligt betong. Dess seghet är i samma nivå som en höghållfasthetsbetong.

3 NUMERISK SIMULERING AV SPRICKBILDNING HOS PUTS

Nedan presenteras resultatet av numerisk simulering av spricktillväxt hos försöksuppställningen i figur 4. Presentationen omfattar enbart indata, beräkningsresultat och diskussion. Vid simuleringen har datorprogrammet DIANA, som är ett kommersiellt datorprogram, använts. Detta program innehåller ett antal materialmodeller för beräkning av brottförlopp hos strukturer. De bakomliggande teorierna hos den modell som har använts för simulering beskrevs delvis i tidigare avsnitt. Intresserade läsaren hänvisas till datorprogrammets manual och de referenser som anges i manualen.

3.1 Indata till beräkningsprogrammet

Den modell som används för simulering av spricktillväxt i puts kräver indata som beskriver putsens kompletta arbetskurva vid enaxiellt dragspänningstillstånd. Arbetskurvan kan matas in med olika grad av approximationer/förenklingar. Den typ av arbetskurva som används vid beräkningarna framgår av figur 14a.



Figur 14 Putsens arbetskurva vid enaxiellt dragspänningstillstånd.

Denna kurva innehåller information om materialets elasticitetsmodul (E), draghållfasthet (f_t) och brottöjning (ε_c). Elasticitets modulen är lutningen hos den uppåtgående delen av kurvan:

$$E = \frac{f_t}{\varepsilon_g}$$

ε_c är töjningen då materialet inte förmår att överföra någon spänning, d.v.s. omedelbart innan materialet delas i två delar. När ε överstiger ε_g bildas en brottzon inom vilken brottenergin konsumeras. Sambandet mellan deformationen inom brottzonen (W) och ε är enligt nedan:

$$\frac{W}{h} = \varepsilon - \varepsilon_i \qquad \varepsilon \geq \varepsilon_g$$

Sambandet mellan W och brottzonens spänning framgår av figur 14b. Det bör observeras att sambandet inte är linjärt i verkligheten, men här förutsätts att detta är fallet. Ytan under σ-W kurvan är lika med brottenergin (G_F), se tidigare avsnitt, därför kan skrivas:

$$W_c = \frac{2G_F}{f_t}$$

ε_c bestäms då $W = W_c$ och $\varepsilon_i = 0$.

$$\varepsilon_c = \frac{W_c}{h} = \frac{2G_F}{h f_t}$$

W_c är sprickvidden omedelbart innan materialet delas i två delar. h är den längd över vilken denna sprickbildning fördelas, vilken även kan beskrivas på ett annat sätt, nämligen att h är den längd över vilken energikonsumtionen under brottprocessen, brottenergin, fördelas. Varken h eller ε_c är en materialegenskap. W_c kan anses vara en materialegenskap. Att man använder ε_c i stället för W_c hänger samman med att den numeriska modelleringen underlättas. Huruvida detta är ett korrekt sätta att modellera spricktillväxt har man diskuterat över 20 år. Detta sätt accepteras av många forskare samtidigt som förkastas av många andra forskare. När det gäller de simuleringar som presenteras här leder båda sätten till i stort sett samma slutsatser.

Arbetskurvan i figur 14a är beroende av putsens ålder. Vid tidig ålder är putsen vekare och svagare samtidigt som den har bättre deformationsegenskaper. Vid stigande härdning ålder ökar putsens styvhet och hållfasthet samt dess deformationsegenskaper försämras. Vid de beräkningar som presenteras här har inte tagits hänsyn till egenskapsförändringar med tiden. Putsen har dock indelats i tre områden med olika hållfastheter, d.v.s. A1, A2 och A3, se figur 4. Indelningen har gjorts för att ta hänsyn till att när krympningen initieras de delar som spricker först har låg hållfasthet. När sprickan når andra områden har dessa områdenas hållfasthet ökat under tiden.

För att minska behovet av datakapacitet samt minska beräkningstiden har symmetrin i försöksuppställningen utnyttjats. Därför har enbart 1/4 del av putsen modellerats, del A i figur 4.

Först utfördes en beräkning för en referens puts med egenskaper enligt tabell 3 rad 1. Med $G_F = 15$ N/m, $f_t = 0.5$ MPa och $h = 0.0075$ m erhålls $\varepsilon_c = 0.008$. Område A2 och A3 har samma ε_c som område A1.Ytterligare 4 beräkningar utfördes där olika indata förändrades, rad 2 – 5.

Som framgår av figur 4 är försöksuppställningen liten i förhållande till en normal putsad yta. För att kunna dra slutsatser som går att relatera till verkliga förhållanden har indata enligt rad 6, Spröd puts, använts. För att kunna överföra resultat från en liten provkropp till en stor provkropp skalar man ner, minskar bl.a. materialets brottseghet, i detta fall ε_c. Genom att sätta $\varepsilon_c = \varepsilon_g$ förändrar man egenskaperna, segheten minskas, så att man kan dra slutsatser för större putsytor.

För att undersöka hur olika materialegenskaper påverkar spricktillväxten har beräkningar genomförts med olika kombinationer av draghållfasthet, elasticitetsmodul och brottenergi. I rad 2 – 5 visas ingående data för beräkningar.

I rad 2 har draghållfastheten ökats, den är dubbelt så stor som referensputsens draghållfasthet. De övriga materialegenskaperna har behållits konstanta. Fördubbling av hållfasthet minskar l_{ch} så att det aktuella materialets l_{ch} blir 1/4 av referensputsens l_{ch}, d.v.s. betydligt sprödare.

I rad 3 har E-modulen minskats med 50% jämfört med referensputsen. De övriga materialegenskaperna har behållits konstanta. Minskning av E-modul minskar l_{ch} men samtidigt ökar putsens deformationsmöjligheter.

I rad 4 har ε_c ökats, den är dubbelt så stor som referensputsens ε_c , medan de övriga materialegenskaperna behållits konstanta. Fördubbling av ε_c medför fördubbling av G_F vid konstant draghållfasthet. I rad 5 har ε_c ökats och E-modulen minskats.

Tabell 3 Indata för beräkningar.

	E (MPa)	ε_c	f_t (MPa), A1	f_t (MPa), A2	f_t (MPa), A2
1- Ref. Puts	7500	0.008	0.50	0.60	0.65
2- 2 x Ref. f_t	7500	0.008	1.00	1.20	1.30
3- 0.5 x Ref. E	3750	0.008	0.50	0.60	0.65
4- 2 x Ref. ε_c	7500	0.016	0.50	0.60	0.65
5- 2 x Ref. ε_c, 0.5 x Ref. E	3750	0.016	0.50	0.60	0.65
6- Spröd puts	7500	$\varepsilon_c = \varepsilon_g$	0.50	0.60	0.65
7- Armerad puts	600	0.02	1.12	1.12	1.12

Det finns inga uppgifter om hur en armerad puts beter sig under brott. I praktiken observeras inga armeringsbrott. Därför kan man utgå från att armeringen inte brister. I figur 15 visas ett armeringsnät som antas vara inbäddad i en puts. Sprickans eventuella tillväxtriktning visas med en pil. Eftersom arbetskurvan inte är känd, det finns ingen uppgift om hur arbetskurvan förändras när sprickans tillväxtriktning inte sammanfaller med armeringens riktning, uppskattades en arbetskurva för en sprucken armerad puts med följande förutsättningar:

- Putsen hålls samman av armeringen och armeringen brister ej.
- Det spruckna putsens styvhet styrs av armeringens styvhet.

Med dessa förutsättningar modellerades en smal remsa, 30 mm, i putsen från det inre hörnet (13) mot det yttre hörnet i X-riktning, se figur 4. De övriga delarnas styvhet var lika stor som den ospruckna putsens styvhet. Dessa delars draghållfasthet valdes på ett sådant sätt att inga sprickor uppstod.

Den smala remsans draghållfasthet och styvhet bestämdes med hjälp av följande betraktelser:

Om putsen spricker vinkelrätt mot X-axeln eller Y-axeln, se figur 15, bestäms putsens draghållfasthet av armeringen.

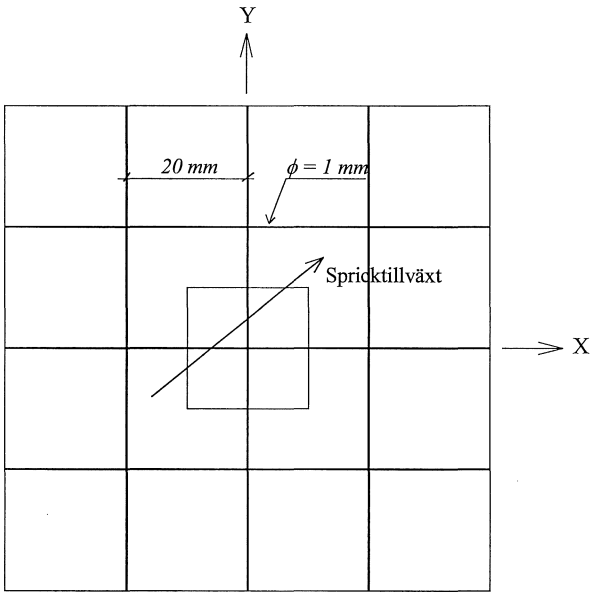
$$f_{sp,t} = \frac{A_s}{A_P} f_{s,t}$$

$f_{sp,t}$ och $f_{s,t}$ är den spruckna putsens draghållfasthet och nättrådens draghållfasthet. A_p och A_s är putsens och armeringens ytor, armeringsandel.

Om man bortser från putsens bidrag till styvhet och antar att armeringen inte glider blir den spruckna putsens elasticitetsmodul enligt nedan:

$$E_{sp} = \frac{A_s}{A_P} E_s$$

E_{sp} och E_s är den spruckna putsens och armeringens elasticitetsmoduler. Med följande data kan man beräkna den spruckna putsens draghållfasthet och elasticitetsmodul i X-riktning och Y-riktning.



Figur 15 Armeringsnät.

$A_p =$ 280 mm^2
$A_s =$ 0.56 mm^2
$E_s =$ 210000 MPa
$f_{s,t} =$ 400 MPa

$f_{sp,t} =$ 1.12 MPa
$E_{sp} =$ 589

Den spruckna putsens draghållfasthet och elasticitetsmodul förändras om sprickans riktning inte är vinkelrätt mot X- eller Y-riktning. Vid de beräkningar som presenteras här har ingen hänsyn tagits till riktningsberoendet hos hållfasthet och elasticitetsmodul. Beräkningarna har utförts med värdena i tabell 3.

Krympningen har antagits att vara jämn över hela ytan och genom sektionen. Krymptöjningen har ökats från 0 till 0.30 mm/m. Denna krympning motsvarar krympning från första till andra dygnet efter tillverkning, se figur 6. I följande avsnitt visas resultaten av beräkningarna.

3.2 Beräkningsresultat

Som framgick ovan har symmetrin i försöksuppställningen, figur 4, utnyttjats. Följaktligen har beräkningarna utförts för en fjärdedel av uppställningen. I verkligheten uppkommer en spricka någonstans på en kropp. Därefter avlastas vissa delar av kroppen. Vissa symmetriska kroppar kan upphöra att vara symmetriska när sprickbildningen kommer igång. Denna försöksuppställning är en sådan kropp.

När putsen krymper uppnås så småningom materialets draghållfasthet vid samtliga hörn. Sprickor bildas vid samtliga hörn. I början är de mycket små och stabila. Med stabil menas att de inte växer om krympningen stannar. Det slutliga brottet uppstår vid det hör som består av den svagaste putsen. Att sprickan växer vid ett hörn betyder att de övriga hörnen blir avlastade och deras krympning tas upp av deformationer, sprickbildning, vid det hörn som håller på med att spricka. När man utnyttjar symmetrin så bortses av krympningsbidragen från övriga hörn. Inverkan på sprickbildningen är att sprickvidden och spricklängden kan bli mindre jämfört med det fall då symmetrin inte utnyttjas, d.v.s. beräkningar som presenteras här underskattar sprickvidder och spricklängder.

I figur 16 visas töjnings- och spänningsfördelningen hos referensputsen, den vänstra delen är töjningsfördelningen, vid olika krympningsnivåer. Vid ökad krympning ökar spänningskoncent-rationen vid det inre hörnet. Spänningskoncentrationen är så stor att snart bildas en spricka. När sprickan växer förskjuts området med högre spänningar framför sprickan mot det yttre hörnet, figur 16b. När krympningen är tillräcklig stor, och sprickan vuxit färdigt, försvinner området med hög spänning och putsen blir avlastad, figur 16c.

Vid beräkningarna har antagits att materialet är homogent och att materialegenskaperna inte varierar. Den enda variation av materialegenskaper som förekommer är skillnaden i draghållfastheterna inom områdena A1, A2 och A3, se ovan. Områdena A1 – A3 framgår av figur 4. Denna ojämnhet är sådan att det inte påverkar sprickans tillväxtriktning. I verkligheten förekommer dels stokastisk fördelning av materialegenskaper och ojämn krympning vilka kan påverka sprickans tillväxtriktning. Vid beräkningar har observerats att det inte krävs så stora skillnader i hållfasthet för att sprickans riktning skulle kunna ändras så att i stället för att gå mot det yttre hörnet, fortsätta mot motstående yttre kanten och hamna en bit under hörnet.

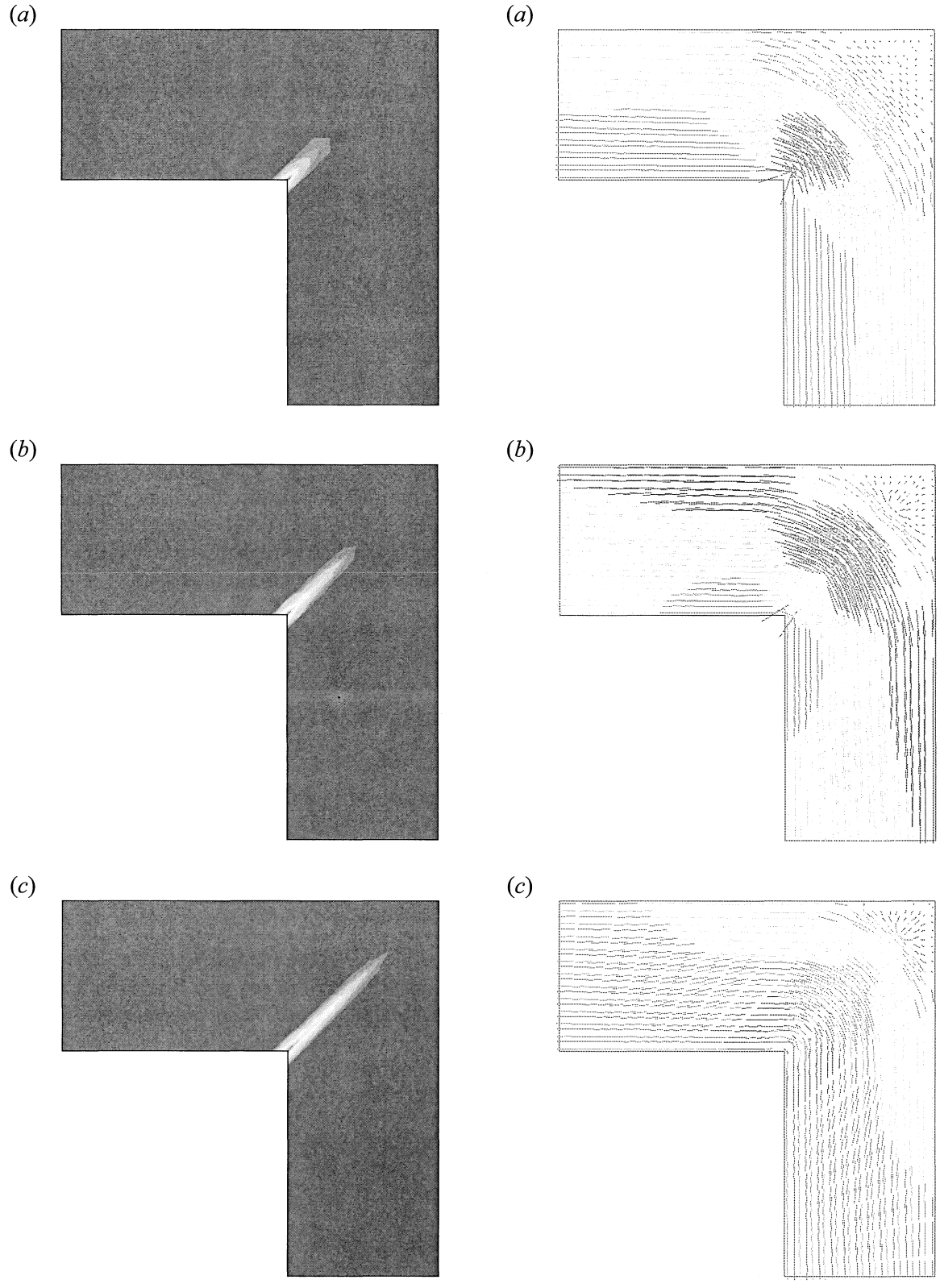
Som framgår av figur 16c skadas putsen, sprickbildningen når nästan fram till det yttre hörnet, redan vid 0.24 mm/m krympning. Denna krympning motsvarar en uttorkning under ca ett dygn, d.v.s. putsen i försöksuppställningen i figur 4 skadas redan två dygn efter tillverkningen – ett dygn efter borttagning av plastfolien. Av figur 16b framgår också att när sprickan växer uppstår relativ stora dragspänningar vid den yttre randen. Detta skulle kunna medföra att nya sprickor bildades vinkelrätt mot den yttre randen med riktning inåt mot den inre randen, om putsen hade varierande draghållfasthet. De nya sprikorna skulle i sin tur kunna avlasta huvudsprickan och dämpa effekten av krympningen.

Vid provningarna har sprickan inte observerats så tydligt som beräkningarna visar. Anledningarna är:

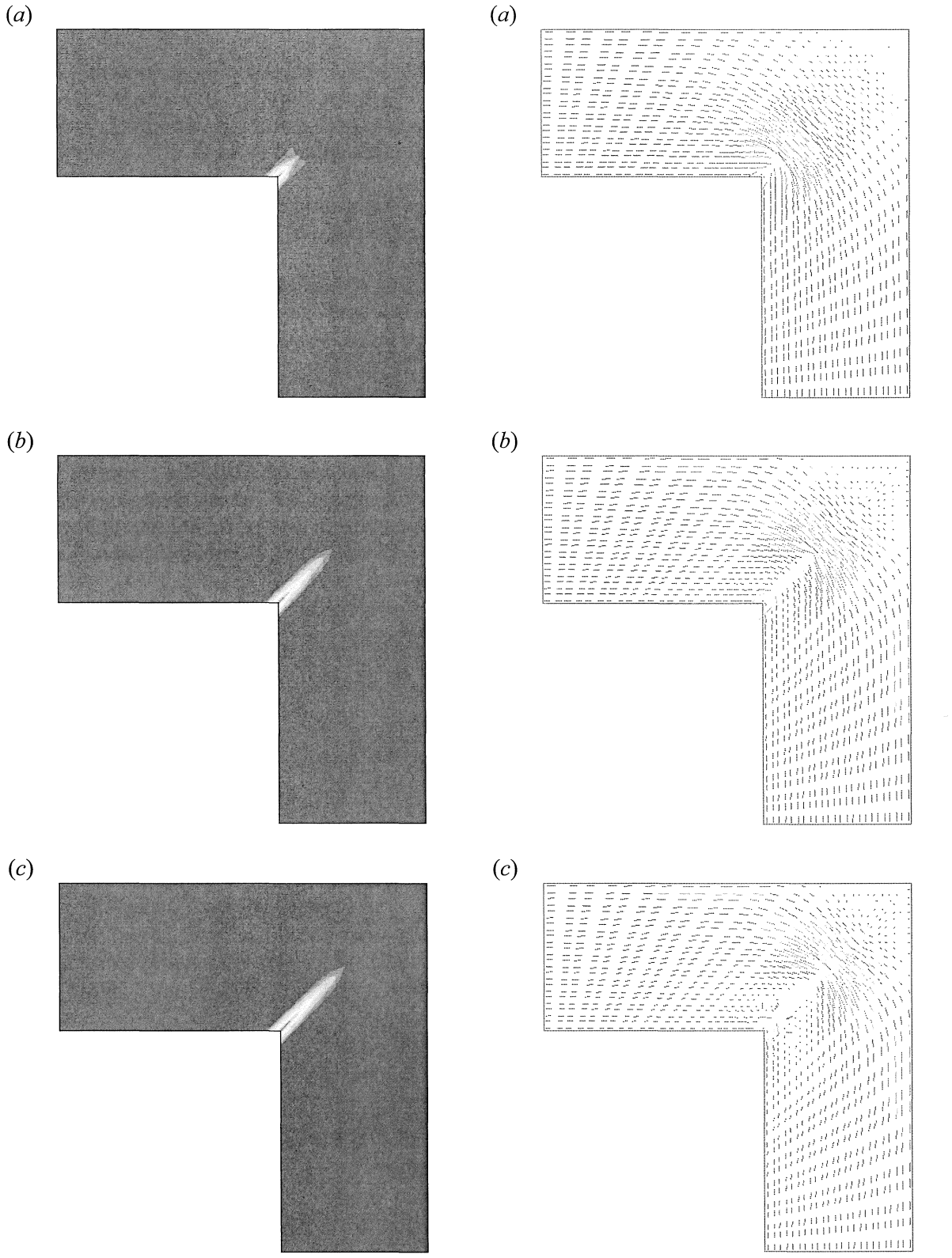
1) Skada antas här uppkomma då materialets draghållfasthet överskrids. När materialets draghållfasthet överskrids bildas mikrosprickor som dels inte är diskreta och dels inte är synliga. De blir synliga efter relativ stora deformationer.

2) Beräkningarna har utförts för jämnt fördelad krympning över ytan och genom sektionen. När krympningen varierar genom sektionen ger den upphov till böjning och kantresning av försöksuppställningen, vilken medför att sprickan inte syns i början, men blir synliga när krympningen utjämnas. Kantresning har observerats vid försöken.

I figur 17 visas sprickbildning hos en spröd puts, data enligt tabell 3 rad 6. Som framgår av figuren beter sig denna puts på samma sätt som ovan, men vid betydligt lägre krympningsnivåer. I en spröd puts krävs mycket mindre krympning att åstadkomma samma skada som en seg puts. Vidare är spänningsnivåerna runt sprickan och längs med den yttre randen betydligt lägre. Denna puts återspeglar beteendet hos en stor putsad yta. När det gäller den armerade putsen bildas inte så stora sprickor för den krympning som har förutsatts vid beräkningar, d.v.s. 0.3 mm/m.



Figur 16 Referensputs, töjnings- och spänningsfördelning.
(a) krympning = 0.080 mm/m, (b) krympning = 0.160 mm/m, (c) krympning = 0.240 mm/m.



Figur 17 Spröd puts, töjnings- och spänningsfördelning.
(a) krympning = 0.024 mm/m, (b) krympning = 0.032 mm/m, (c) krympning = 0.040 mm/m.

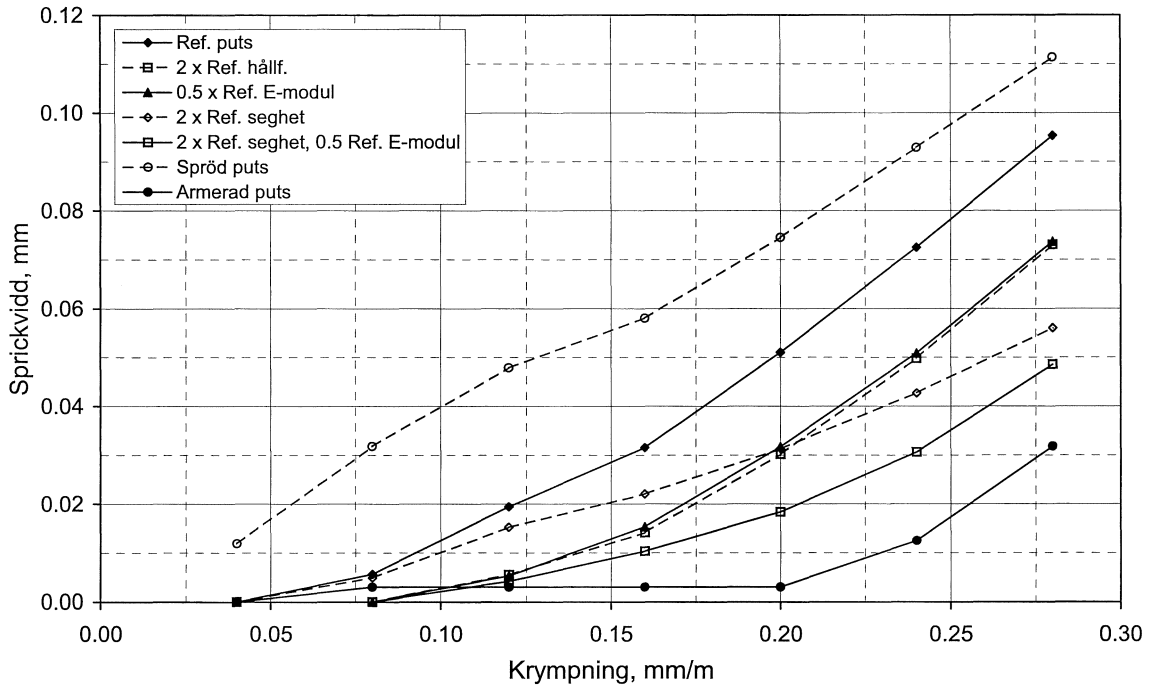
I figur 18 visas samband mellan sprickvidd och krympning. Sprickvidden är bestämd 17 mm framför det inre hörnet, detta för att undvika de numeriska effekterna som uppstår i närheten av skarpa kanter.

Den spröda putsen visar stor sprickningsbenägenhet. Sprickor bildas vid relativ liten krympning. Referensputsen visar, jämfört med ovan, mindre uppsprickningsbenägenhet vid låga krympningar men närmar sig den spröda putsen när krympningen blir stor. Detta är rimligt eftersom vid stora krympningar blir referensputsen så skadad att krympdeformationerna tas upp vid sprickan.

Fördubbling av draghållfastheten minskar sprickvidden. Den har samma effekt som att halvera putsens elasticitetsmodul, lägre elasticitetsmodul leder till lägre dragspänningar.

Ökning av seghet hos putsen leder till mindre sprickvidder. Låg styvhet i kombination med bättre seghet leder till ännu bättre sprickegenskaper. Denna puts uppvisar egenskaper som inte är långt ifrån den armerade putsen. Fiberarmering av puts kan höja segheten avsevärt, se tidigare avsnitt.

Den armerade putsen uppvisar relativ låga sprickvidder. De sprickvidder som visas i figuren inkluderar även de deformationer som föregår sprickbildning i putsen. Det bör noteras att beräkningarna för den armerade putsen är baserad på förenklade antaganden, se ovan. Det är svårt att ange hur stor sprickvidden blir vid avslutad krympning. I armerad puts blir sprickorna fördelade d.v.s. uppstår flera sprickor i stället för en spricka. Om vi antar att det bildas enbart en spricka blir den slutliga sprickvidden, när sprickan har nått ända fram till den yttre kanten, lika stor som den sprickvidd som uppkommer vid sprödputsen ca 0.11 mm. Det krävs dock mycket större krympning för att åstad komma denna sprickvidd i en armerad puts jämförd med en sprödputs.



Figur 18 Samband mellan sprickvidd och krympning.

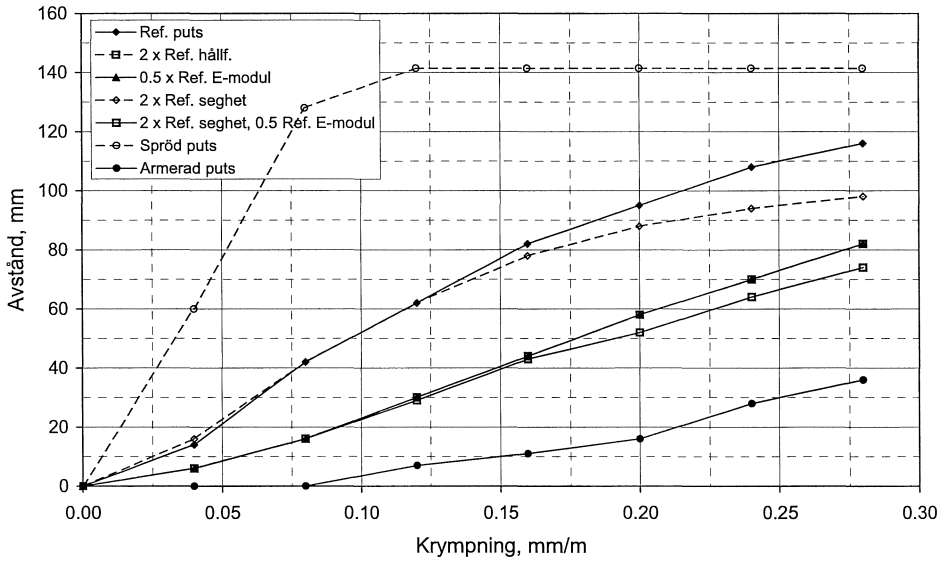
I figur 19 visas avståndet från det inre hörnet till det område inom vilket materialets draghållfasthet har uppnåtts. Avståndet ökar i takt med att sprickan växer med ökad krympning. Avståndet från det inre hörnet till det yttre är 141 mm. Detta avstånd är längden hos det skadade området och det kan innehålla både diskreta synliga sprickor och sprickor som delvis kan överföra spänning, de har viss hållfasthet kvar, se tidigare avsnitt.

När det gäller den spröda putsen ökar det skadade områdets längd snabbt, redan vid 0.1 mm/m krympning är den spröda putsen helt uttömd på sin bärförmåga. Det skadade områdets längd hos referensputsen och puts som har dubbelt så stor seghet ökar ungefär med samma takt och takten är snabbare jämfört med den puts som har dubbelt så stor hållfasthet och de som har lägre styvhet.

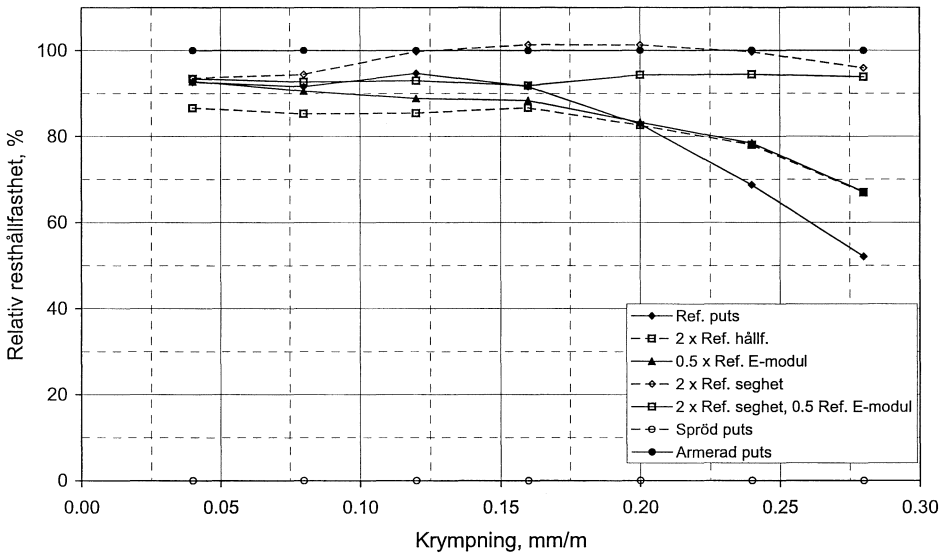
Det skadade områdets längd hos det armerade putsen visas också. Det bör dock observeras att ingenstans har den armerade putsens draghållfasthet uppnåtts, d.v.s. armeringen som bär lasten inte har brustit. Det som visas i figuren är då spänningen har uppnåtts grundputsens draghållfasthet.

Det är inte enbart det skadade områdets längd som är intressant utan man bör samtidigt beakta resthållfastheten hos det skadade området. Med resthållfasthet menas den spänning som kan överföras inom en brottzon, se tidigare avsnitt. Den relativa resthållfastheten visas i figur 20, vilken är medelvärdet av resthållfastheten i det skadade området dividerat med hållfastheten i del A1.

Den spröda putsen har så dåligt seghet så att den inte har någon resthållfasthet, figur 20. Referensputsen uppvisar relativ hög resthållfasthet i början och sedan sjunker relativt snabbt. Ungefär samma tendenser visar puts som har högre hållfasthet och puts med lägre styvhet än referensputs. Puts som har stor seghet uppvisar relativt hög resthållfasthet, vilken kan vara fördelaktig när det gäller omfördelning av spänningar. Den armerade putsen uppvisar, som väntat, 100% resthållfasthet. Den armerade putsen kommer att uppvisa hög resthållfasthet även vid större krympning. Här förutsätts dock att de antagande som är gjorda beträffande den armerade putsen gäller.



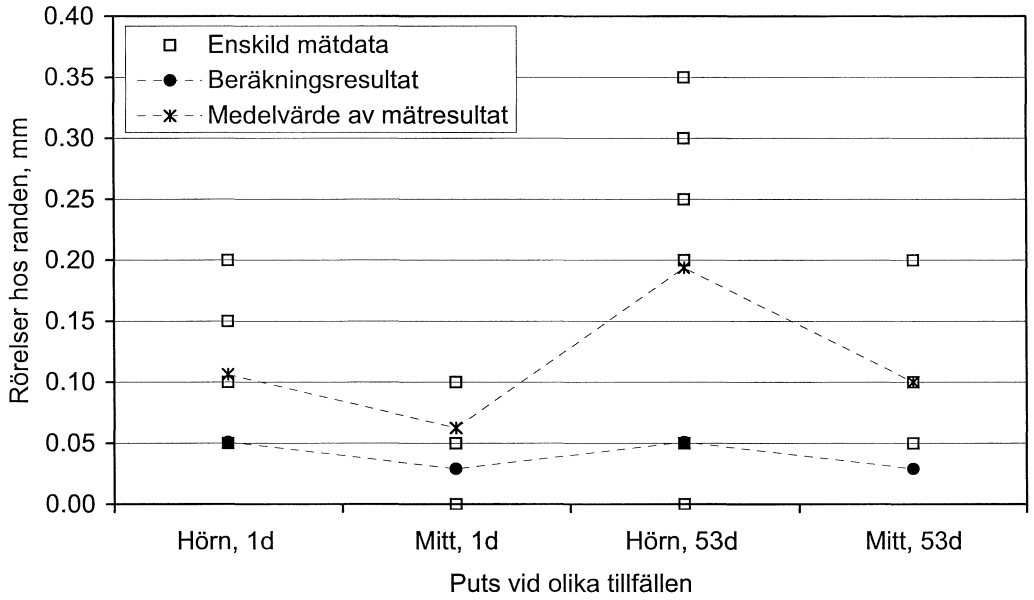
Figur 19 Avståndet från inre hörnet till det skadade området.



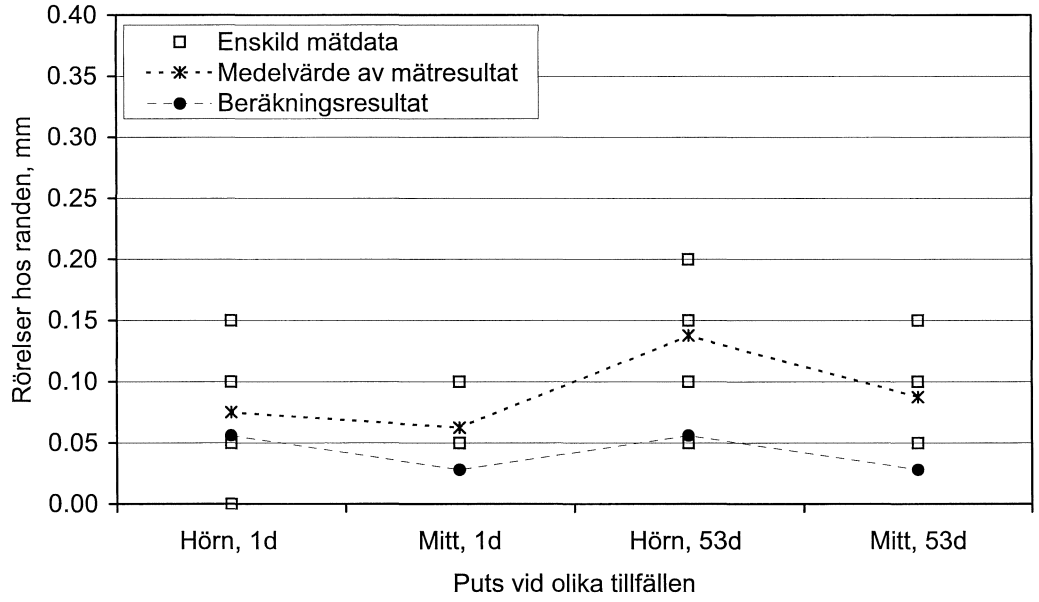
Figur 20 Relativ resthållfasthet i det skadade området.

4 JÄMFÖRELSE MELLAN FÖRSÖK OCH NUMERISK SIMULERING

Nedan jämförs resultaten av beräkningar med försöksresultaten. I figur 21 och 22 visas rörelserna hos randen dels värden från försöken, mätpunkterna 1 – 12 enligt figur 4, och dels de värden från beräkningarna. När det gäller hörnen visas medelvärdet av mätpunkterna vid varje hörn, t.ex. värdet för det högra övre hörnet är medelvärdet av punkt 1 och 2. När det gäller försöksresultaten avser "Mitt" värdena från punkt 3, 6, 9 och 12 enligt figur 4. "1d" respektive "53d" avser mätningar 1 respektive 53 dygn efter avtäckningen, start av krympning. Antal mätdata är 8 för hörn. Vissa mätdata är lika stora och sammanfaller. Därför är i figurerna redovisade antal mätdata inte är 8.



Figur 21 Rörelser hos randen, oarmerad puts.



Figur 22 Rörelser hos randen, armerad puts.

De ifyllda punkterna är beräkningsresultat medan de övriga avser mätningsresultat. Datapunkter markerade med (*) är medelvärdet av mätningar. På grund av att beräkningen är utförd med hänsyn till

symmetrin finns det enbart ett värde för hörn och ett värde för kant. Beräkningsresultaten gäller för krympning motsvarande 0.3 mm/m som ungefär motsvarar den krympning som uppkommer under det första dygnet.

Beräkningarna leder inte fram till exakt samma resultat som försöken, men de kommer fram till rätt storleksordning. Mätningsresultaten stämmer i genomsnitt överens med beräkningsresultaten Vid beräkningarna tas inte hänsyn till ojämn krympning och kantresning. Vidare, har symmetrin i försöksuppställningen utnyttjats. Som framgick ovan inträffar inte brottet symmetriskt. Sprickvidden är dessutom svår att avläsa.

I tabell 4 och 5 visas sprickvidderna vid de inre hörnen vid olika tider. I tabellerna visas även det beräknade värdet för sprickvidden vid 0.3 mm/m krympning, vilken motsvarar en total krympning under de inledande första och andra dygnen. Det bör noteras att de beräknade sprickvidderna avser sprickvidder ca 17 mm in i putsen och krympning under tre dygn, se ovan. Beräkningarna avser referensputsen och den armerade referens putsen.

Som framgår av tabellerna kan beräkningarna inte förutse försöksresultaten exakt, men de beräknade värdena är inte långt ifrån försöksresultaten.

Tabell 4 Sprickvidder vid olika hörn enligt mätningar och sprickvidder enligt beräkningar. Oarmerad puts.

Ålder, dygn	13 Sprickvidd, mm	14 Sprickvidd, mm	15 Sprickvidd, mm	16 Sprickvidd, mm	Beräkning mm
1	0.03	0.08	0.08	0.03	
3	0.05	0.10	0.10	0.03	0.10
4	0.05	0.10	0.10	0.03	
7	0.05	0.10	0.10	0.03	
56	0.10	0.10	0.08	0.50	

Tabell 5 Sprickvidder vid olika hörn enligt mätningar och sprickvidder enligt beräkningar. Armerad puts.

Ålder, dygn	13 Sprickvidd, mm	14 Sprickvidd, mm	15 Sprickvidd, mm	16 Sprickvidd, mm	Beräkning mm
1	0.02	0.02	0.01	0.02	
3	0.05	0.05	0.01	0.04	0.03
4	0.05	0.05	0.01	0.04	
7	0.05	0.05	0.01	0.04	
56	0.10	0.08	0.03	0.08	

5 SLUTSATSER

- Försöksresultaten och beräkningarna visar att grunden för uppsprickning av den putskvalitet som användes vid denna undersökning läggs redan vid den tidiga åldern. Sedan är det en tidsfråga innan sprickorna utvecklas och blir synliga.

- Ökning av putsens draghållfasthet har inte så stor inverkan på sprickbildningen. Beträffande sprickbildningen har minskning av putsens elasticitetsmodul samma inverkan som ökning av putsens draghållfasthet.

- Ökning av putsens brottseghet har stor inverkan på sprickbildning. Inverkan blir större om elasticitetsmodulen minskar med bibehållen draghållfasthet. Nät- och fiberarmerad puts är därför bra lösningar när det gäller att förebygga sprickbildningar.

- Överstämmelsen mellan försöksresultaten och beräkningarna är god.

6 FORTSATTA ARBETEN

Fortsatta arbeten den närmaste tiden omfattar följande delar:

1. Ojämn torkning av puts medför ojämn krympning, vilken kan leda till sprickbildning. Detta fenomen medför att olika typer av spänningar och deformationer kan uppstå, se vidare figur 2b, d, e och f. Fenomenet kommer att studeras närmare genom datorberäkningar. Även inverkan av materialegenskaper på sprickbildningen kommer att studeras.

2. Inverkan av armeringsnätets placering och mängd på sprickbildning kommer att studeras med hjälp av datorberäkningar, se även figur 2g och h.

3. Puts består ofta av flera skikt. Beteendet hos tvåskiktputs med avseende på sprickbildning kommer att studeras med hjälp av datorberäkningar. Vid tvåskiktsputsning appliceras grundputsen först därefter appliceras det andra skiktet. Inverkan av grundputsens krympning och mekaniska egenskaper vid appliceringen av det andra skiktet på putsens sprickbildning kommer att studeras.

Fortsatta arbeten på längre sikt framgår av Sandin (1998), sid. 41.

REFERENSER

DIANA Finite Element Analysis, DIANA Analysis bv, Delft, The Netherlands.

Fagerlund, Göran, 2000, Kompendium i Byggnadsmateriallära FK, Avdelningen för Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola.

Petersson, Per-Erik, 1981, Crack Growth and Development of Fracture Zones in Plain Concrete and Similar Materials, Report TVBM-1006, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, Lund Sweden.

Sandin Kenneth, 1998, Beständighet hos Putsade Fasader – Probleminventering, Rapport TVBM-3079, Avdelningen för Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola.