~~2147~~
5038 = Lyft nummer

SPRICKBILDNING ORSAKAD AV PLASTISK KRYMPNING

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

Förord

Sammanfattning
Ny modell för sprickbildning orsakad av plastisk krympning
Faktorer som påverkar plastisk krympning och sprickbildning
Praktiska rekommendationer
Fortsatt forskningsbehov

1 Introduktion
- 1.1 Bakgrund
- 1.2 Syfte
- 1.3 Genomförande

2 Enkät

3 Problemställning och litteraturstudier

3.1 Sättning och plastisk krympning

3.2 Mekanismen vid plastisk krympning
- 3.2.1 Avdunstningshastighet
- 3.2.2 Avdunstningsyta
- 3.2.3 Provets tjocklek
- 3.2.4 Krympmodul

3.3 Spännings- och deformationstillstånd i nygjuten betong

3.4 Betongens struktur i tidig ålder

3.5 Brottmekaniska egenskaper hos betong i tidig ålder

3.6 Risken för sprickbildning

3.7 Slutsatser

4 Modellbeskrivning

4.1 Typer av sprickor orsakade av plastisk krympning

4.2 Mekanismen vid sprickbildning

4.3 Tillstånd som kan ge upphov till sprickbildning

4.4 Plastisk krympning

4.5 Slutsatser

5 Program och försöksbetingelser

5.1 Program

5.2 Delmaterial

5.3 Sammansättning och tillverkning

5.4 Provningsmetoder

6 Analys av laboratorieundersökningar

7 Fältundersökningar

8 Slutsatser och praktiska rekommendationer

9 Referenser

BILAGA 1 Laboratorieundersökningar:

A. OFÖRHINDRAD PLASTISK KRYMPNING HOS BETONG

A.1 Inverkan av betongsammansättning

1. Cement typ
2. Vattencementtal
3. Volymandel pasta (cementhalt)
4. Flyttillsats
5. Tillsatsmaterial (silika och fiber)

A.2 Inverkan av lagringsbetingelser

1. Fri avdunstning vid olika avdunstningshastigheter
2. Vattenlagring
3. Membranhärdning (plastfolie och membranhärdare)
4. Temperatur

A.3 Inverkan av provkroppsstorlek

1. Provkroppens längd
2. Provkroppens tjocklek

B. SPRICKBILDNING HOS BETONG

B.1 Inverkan av betongsammansättning

1. Cement typ
2. Vattencementtal
3. Volymandel pasta (cementhalt)
4. Flyttillsats
5. Tillsatsmaterial (silika och fiber)

B.2 Inverkan av lagringsbetingelser

1. Fri avdunstning vid olika avdunstningshastigheter
2. Vattenlagring
3. Membranhärdning (plastfolie och membranhärdare)
4. Temperatur

B.3 Inverkan av provkroppsstorlek

1. Provkroppens längd
2. Provkroppens tjocklek

C. SPRICKBILDNING HOS TUNNA SKIKT AV CEMENTPASTA OCH BRUK

BILAGA 2 The influence of superplasticizers on the degree of flocculation of cement grains, Konferensbidrag till Fourth CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, October 1994, Montreal Canada.

Sammanfattning

Sprickbildning i nygjutna plattkonstruktioner av såväl normal som högkvalitativ betong har blivit ett problem i Sverige de sista 20 åren. Detta är anmärkningsvärt eftersom landet har ett klimat som är gynnsam för platsgjutning. Det finns två aspekter som kan betraktas som huvudorsaker till denna förändring. För det första att man av någon anledning inte är lika noggrann som förr med att skydda betongen mot tidig uttorkning. En sådan inställning kan motiveras av att ibland klarar sig betongen utmärkt utan något skydd. För det andra att modern betong har stor sprickbildningsbenägenhet, vilket bekräftas av fallen då sprickor uppstår trots att åtgärder för att förhindra tidig uttorkning vidtagits (vattenbegjutning eller påsprutning med membranhärdningsvätska) [3]. Den viktigaste frågan forskningen måste svara på är om sprickbildning i tidig ålder är ett utförande- eller materialproblem.

Det finns i litteraturen ett antal teorier, mestadels baserade på iakttagelser på arbetsplatser, som påstår t ex att:

- kvadratiska gjutfack ger gynnsammare spänningsfördelning under krympförloppet [40]
- fiberarmering ökar betongens draghållfasthet, vilket minskar risken för sprickbildning
- friktionen mellan betongplattan och dess underbyggnad påverkar deformationstillståndet och därmed spänningsfördelningen
- problemet med sprickbildning i tidig ålder accentuerades då flyttillsatser började användas.

Sanningsvärdet hos dessa påståenden kan vara högt, men det framgår ytterst sällan vilken typ av sprickor dessa teorier syftar på.

Oftast konstateras sprickbildningen ett dygn efter gjutning och då är det försent att kunna fastställa den verkliga orsaken till utvecklingen av sprickor. Med andra ord kan det vara svårt för den som rapporterar sprickorna att skilja på plastiska krympsprickor, vanliga krympsprickor, avsvalnings- och belastningssprickor.

Den s k plastiska krympningen, dvs den krympning betongen genomgår innan hårdnandet har påbörjat, uppstår då en nygjuten betong utsätts för tidig uttorkning. Torksprickor orsakade av plastisk krympning brukar uppstå 1-6 timmar efter gjutning. Betongens tillstyvnande, som kan betraktas som den viktigaste kraften som bromsar och stoppar den plastiska krympningen, fördröjs vid lägre temperaturer än 20 °C eller vid användning av flytmedel. I sådana fall kan torksprickor uppstå senare än 6 timmmar.

Orsaken till sprickbildning i mycket tidig ålder debatterades livligt på 60 och 70-talet, dock utan att leda till en fullständig förståelse av fenomenet. Man kom fram till att de viktigaste orsakerna är sättningsrörelser och plastisk krympning hos betongmassan, men när det gäller sambanden mellan materialparametrar och utvecklingen av sprickor är åsikterna ofta motstridiga [21]. Detta kan bero dels på att man inte fullständigt förstått mekanismen vid plastisk krympning och dels på mycket ringa kunskaper om betongens brottmekaniska egenskaper i tidig ålder.

En generell beskrivning av fenomenets komplexitet ges i [36]:

> "Sprickbildning som orsakas av såväl sättningar som plastisk krympning beror på flera material-, konstruktions- och miljöparametrar. Flera av dessa parametrar kan påverka å ena sidan deformations- och spänningstillståndet och å andra sidan utvecklingen av betongens töjbarhet och hållfasthet. Det är därför inte alltid så enkelt att förutsäga på vilket sätt en förändring av en parameter påverkar betongens sprickbildningsbenägenhet".

För att kunna lösa problemet med sprickbildning i tidig ålder, måste forskningen utgå från två viktiga betongbyggnadstekniska frågeställningar:

1. är det möjligt att utveckla betongsammansättningar som är mycket mindre känsliga för tidig uttorkning, utan stora förändringar i delmaterialens egenskaper eller arbetsutförandet?
2. vilken är den lämpligaste efterbehandlingen för de betongsammansättningar som måste skyddas mot tidig uttorkning?

Projektets syfte är att i första hand svara på frågan om sprickbildning hos betong i tidig ålder är ett utförande- eller materialproblem. Den experimentella delen är inriktad på att undersöka eventuella samband mellan plastisk krympning/sprickbildning och miljö- och materialparametrar:

- betongparametrar:
  - cementtyp och malfinhet
  - vattencementtal
  - volymandel pasta (cementhalt)
  - flytmedel
  - tillsatsmaterial (silika och fiber)

- miljöparametrar:
  - luttemperatur
  - luftfuktighet
  - vindhastighet

- efterbehandling
  - fri avdunstning med måtliga och låga avdunstningshastigheter
  - vattenlagring
  - membranhärdning (plastfolie och membranhärdare)

- provkroppsstorlek
  - provkroppens tjocklek
  - provkroppens längd

Projektet inleddes med omfattande litteraturstudier och en enkät, som skickades till arbetsledare i Göteborgsområdet.

En sammanfattning av enkäten lyder som följande: alla typer av sprickor kan utvecklas i princip var som helst och när som helst, nästan oavsett betongsammansättning och efterbehandling. Detta understrycker problemets omfattning och behovet att klarlägga

mekanismerna vid plastisk krympning och sprickbildning.

Några fältmätningar, då avdunstning och vattentryck bestämdes, kompletterar den experimentella delen.

Ny modell för sprickbildning orsakad av plastisk krympning

De flesta betongsammansättningar som används idag (dvs modern betong) kännetecknas av låg vattenseparation. Konsekvensen av låg vattenseparation är att betongytan blir torr strax efter gjutning, vilket resulterar i att sättning och plastisk krympning blir samtidiga fenomen. Dessutom påverkar tillsatsmaterialen och flyttillsatserna dels krympningsförloppet och dels utvecklingen av betongens draghållfasthet; hög fillerhalt och flytmedel fördröjer tillstyvnandet och utvecklingen av draghållfasthet.

Hos betong med låg vattenseparation börjar den plastiska krympningen strax efter gjutning, vilket betyder att sprickbildning i mycket tidig ålder är till största delen ett materialproblem.

Vid utvecklingen av en beräkningsmodell som beskriver sprickbildningen orsakad av avvattning genom avdunstning, måste olika typer av sprickor beaktas. Man kan då välja rätt kombination av ballastmaterial, fiber och underbyggnad för att utveckla sprickfria betongsammansättningar (små sprickor jämnfördelade i hela massan fylls av hydratationsprodukter under första dygnet efter gjutning och anses inte vara "farliga"). Det är därför ytterst viktigt att man är medveten om att både synliga och osynliga sprickor kan utvecklas i en betongmassa utsatt för tidig uttorkning, se Fig. 1.

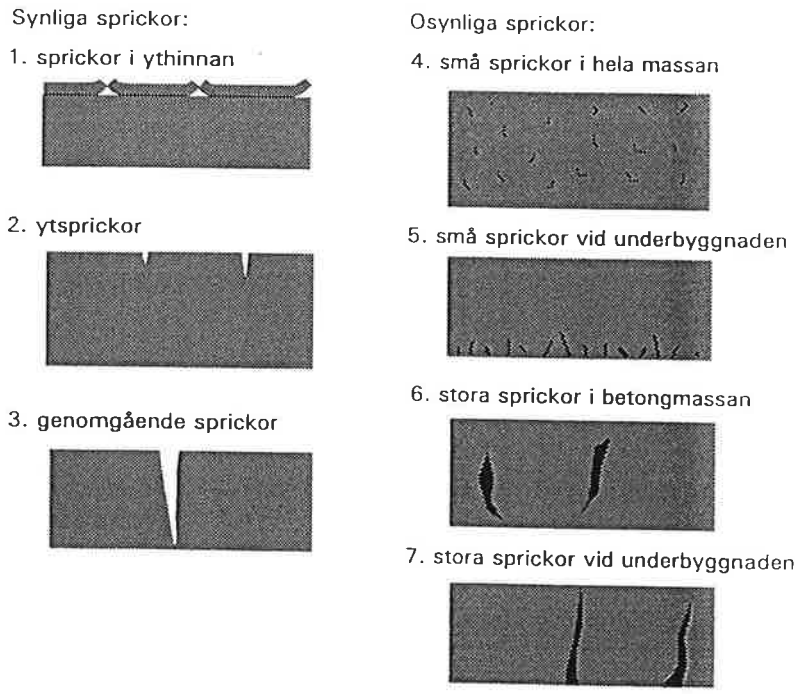


Fig. 1 Typer av sprickor

Modellen för sprickbildning i tidig ålder, som man kan finna i litteraturen och som jämför den plastiska krympningen med betongens brottöjning, beskriver inte kopplingen mellan krympning och utveckling av dragspänningar och är därför praktiskt oanvändvar. Det är inte själva krympningen som orsakar sprickbildningen utan samspelet mellan krympskillnader och en rad konstruktionsparametrar.

Då betongmassan utsätts för tidig uttorkning uppstår undertryck i blandningsvattnet. Betongen avvattnas, genom att kapillära krafter transporterar en del av blandningsvattnet til ytan, och det fasta materialet konsolideras. Hastigheten hos konsolideringen beror på avdunstningshastigheten, betongens permeabilitet och de fasta partiklarnas rörlighet i förhållande till varandra (ballastkornen är mindre rörliga än cementkornen). Avvatningen är störst vid betongens överyta och i områdena med stor porositet: formkanter och ballastytor pga väggeffekten, samt olika defekter pga undermålig gjutning och vibrering. Konsolideringen innebär omlagring av det fasta materialet, vilket betyder att, för inte allt för styva konsistenser, är relaxationen mycket hög. Betongen beter sig som en tjock vätska och dragspänningar kan inte uppstå.

På grund av avvattning och kemiska reaktioner förlorar så småningom betongen sin plasticitet (förmågan att konsolideras genom omlagring) och tillstyvnar. Tillstyvnandet påverkas framför allt av vattencementtal, graden av avvattning och temperatur.

Dragspänningar och sprickor kan utvecklas då krympningen inte motsvaras längre av en omlagring hos det parikelformiga materialet.

Miljö- och materialparametrarna bestämmer i första hand krympningshastigheten och krympningens slutvärde och i andra hand utvecklingen av betongens draghållfasthet. För att förklara utvecklingen av dragspänningar måste tas hänsyn till ett antal konstruktionsparametrar:

1. utformning:
   - plattans bredd, längd och tjocklek
   - förstyvningar (balkar, voter, mm)
2. randvilkor:
   - formkanter
   - underbyggnad
3. armering

och till de samverkande belastningar: ojämn deformation pga krympning och betongens egenvikt.

En ny modell för sprickbildning, som jämför utvecklingen hos dragspänningar med betongens draghållfasthet, utvecklades (se Fig. 2). Enligt modellen uppstår sprickor i de punkter i betongmassan där dragspänningarna överstiger draghållfastheten.

Modellens första nyhet består i att både krympning och konstruktionsparametrar betraktas som bestämmande faktorer vid utvecklingen av dragspänningar. Hos t ex en relativt liten provkropp kommer aldrig dragspänningarna att överstiga draghållfastheten och därmed kan man inte vänta sig att få se några riktiga krympsprickor.

Den andra nyheten är att modellen inför skillnaden mellan beräknad och aktuell utveckling av dragspänningar. Då dragspänningar uppstår i betongen kommer spänningsnivån att minskas av betongens relaxation som beror på:

- betongens krypning
- små brott vid ballast- och fiberytorna
- små sprickor vid underbyggnaden.

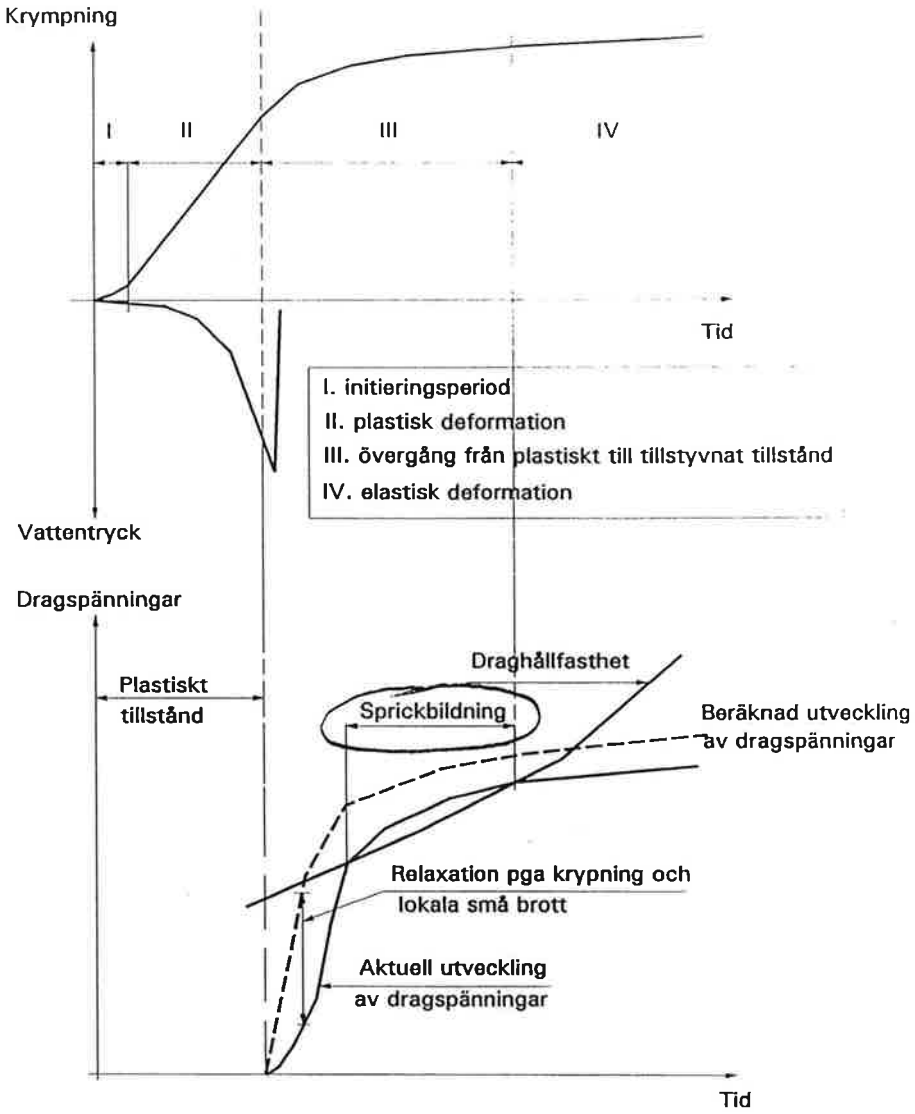


Fig. 2 Ny modell för sprickbildning

Faktorer som påverkar plastisk krympning och sprickbildning

De viktigaste slutsatserna angående den oförhindrade krympningen hos relativt små provkroppar (100*100*320 mm och 100*120*700 mm) är följande:

1. krympningsastigheten och krympningens slutvärde ökar med ökad avdunstningshastighet; vid vattenlagring eller membranhärdning utvecklas inte den plastiska krympningen

2. horisontell krympning är alltid störst vid överytan (ojämn krympning) speciellt vid lösa konsistenser
3. vid lägre vattencementtal uppstår tryckgradienter mellan olika djup, vilket ökar skillnaden mellan sammandragningen vid ytan och betongens mittparti
4. den vertikala krympningen är alltid större än den horisontella krympningen; 2-3 gg större hos högre vattencementtal
5. den vertikala krympningen ökar med ökad tjocklek hos betongplattan
6. vid lägre temperaturer fördröjs betongens tillstyvnande, vilket förlänger perioden av plastisk deformation
7. avdunstningshastigheten påverkas av betongens konsistens

De faktorer som påverkar sprickbildningen kan indelas i två grupper:

1. POSITIVA

- lämplig efterbehandling:
- skydd mot tidig uttorkning (plastfolie, tält, bra membranhärdare)
- vakuumsugning (den utsätter betongen för samma krafter som plastisk krympning fast under ender en kort period då det fasta materialet kan omlagras utan sprickbildning; tidig uttorkning kan inte sedan åstadkomma yterligare deformationer)

- relaxation pga små brott vid ballast- och fiberytorna, samt vid lämplig underbyggnad (rätt kombination av ballast och fiber kan ge sprickfria betongsammansättningar)

2. NEGATIVA

- undermålig gjutning och vibrering skapar områden med högre vatteninnehåll, vilket ökar utvecklingen av ojämn krympning och dragspänningar

- alla parametrar som fördöjer tillstynandet: retarderande tillsatsmedel, flyttillsatser, lägre luft temperatur

- ballastseparation ökar skillnaderna mellan krympningen vid ytan och betongens mittparti

- tillsatsmaterial (filler, slam, flygaska och silika) ökar krympningens slutvärde och försenar utvecklingen av tidig draghållfasthet

- ogynnsam utformning (stora gjutfack, tunna plattor, oregelbundenheter i plattans tjocklek) ger upphov till utveckling av stora dragspänningar

- överkantsarmering

Praktiska rekommendationer

För att uppskatta risken för sprickbildning som funktion av specifierade miljö-, material- och konstruktionsparametrar eller för att utveckla sprickfria betongsammansättningar måste ett beräkningsprogram utvecklas. Innan dess måste betongen skyddas (vattenbegjutning, helst i form av dimma, täckning med plastfolie, lämplig memranhärdare) mot tidig uttorkning eller använda vakuumsugning sammansättningar som är lämpliga för det.

Risken för sprickbildning kan minskas genom att:

1. minska filler- och slamhalten och ersätta den med cement för att inte få en alltför kraftig vattenseparation

2. använda minsta möjliga mängd flytmedel

3. använda accelererande tillsatsmedel, speciellt vid kraftig uttorkning, då det är möjligt

4. använda plast- och stålfiber

Fortsatt forskningsbehov

Utvecklingen av ett beräkningsprogram som beskriver sprickbildningen som funktion av miljö-, material- och konstruktionsparametrar innebär:

A. Undersöka betongens brottmekaniska egenskaper (spännings-deformations-samband och draghållfasthet) som funktion av materialparametrar, ålder och grad av avvatning. Två förslag till mätutrustning visas i Fig. 3.

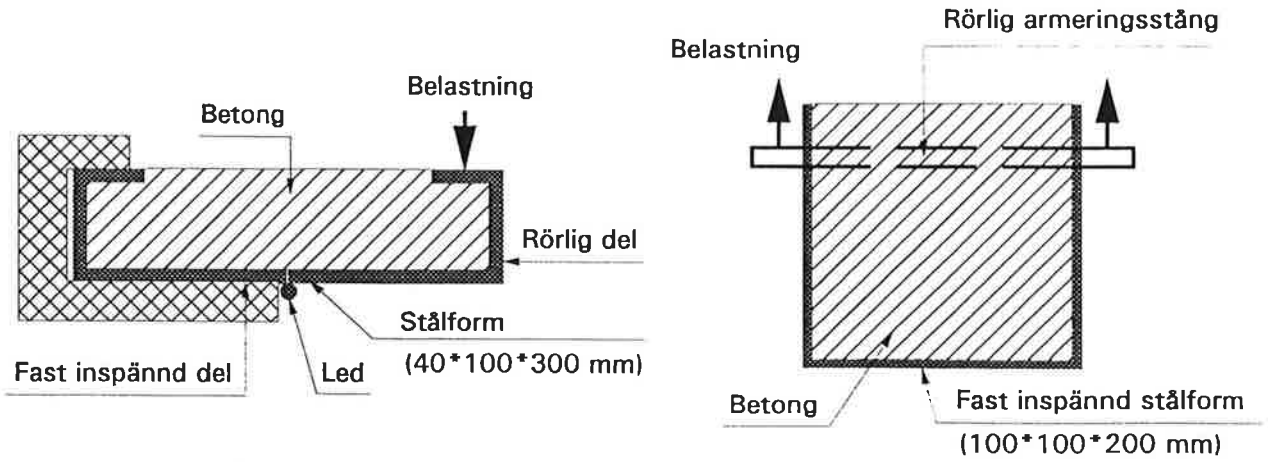


Fig. 3 Mätutrustning för bestämning av brottmekaniska egenskaper.

A. Utarbeta ett program baserat på finita element metoden som uppskattar utvecklingen av dragspänningar hos ett antal betydelsefulla fall (se Fig. 4) och kombinationer av dessa fall.

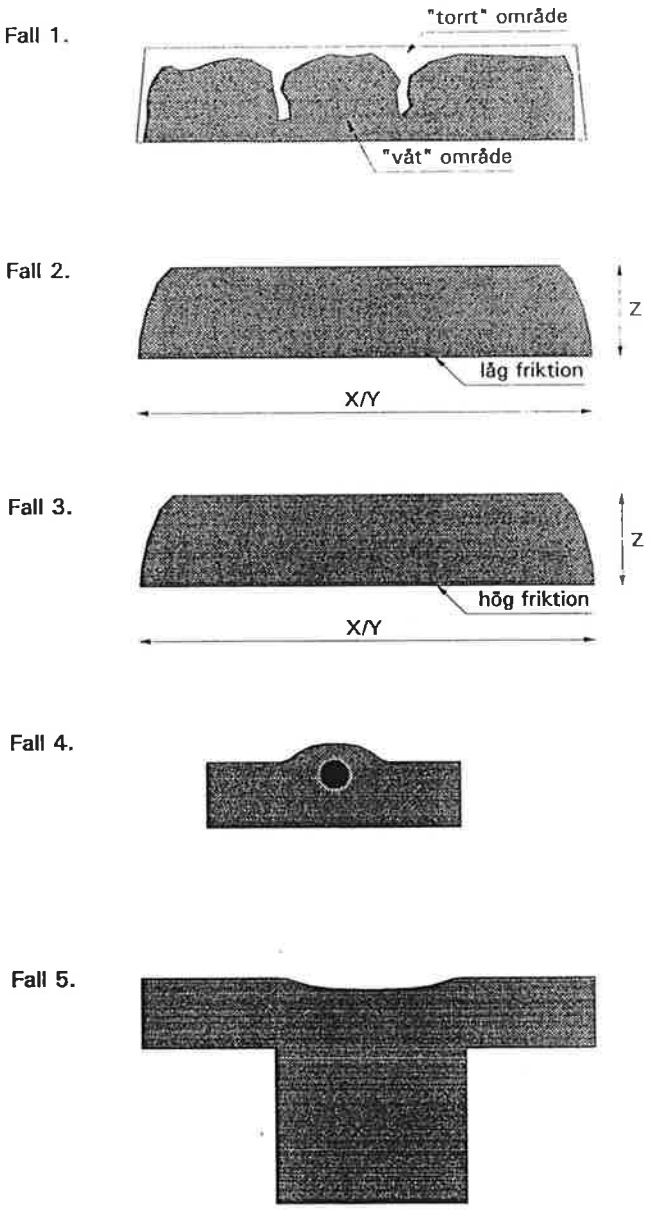


Fig. 4 Tillstånd som kan ge upphov till sprickbildning.

C. Verifiera beräkningsprogrammet med hjälp av laboratorie- och fältundersökningar.

1 Introduktion

1.1 Bakgrund

Sprickbildning i nygjutna plattkonstruktioner av såväl normal som högkvalitativ betong har blivit ett problem i Sverige de sista 20 åren. Detta är anmärkningsvärt eftersom landet har ett klimat som är gynnsam för platsgjutning. Det finns två aspekter som kan betraktas som huvudorsaker till denna förändring. För det första att man av någon anledning inte är lika noggrann som förr med att skydda betongen mot tidig uttorkning. En sådan inställning kan motiveras av att ibland klarar sig betongen utmärkt utan något skydd. För det andra att modern betong har stor sprickbildningsbenägenhet, vilket bekräftas av fallen då sprickor uppstår trots att åtgärder för att förhindra tidig uttorkning vidtagits (vattenbegjutning eller påsprutning med membranhärdningsvätska) [3]. Den viktigaste frågan forskningen måste svara på är om sprickbildning i tidig ålder är ett utförande- eller materialproblem.

Det finns i litteraturen ett antal teorier, mestadels baserade på iakttagelser på arbetsplatser, som påstår t ex att:

- kvadratiska gjutfack ger gynnsammare spänningsfördelning under krympförloppet [40]
- fiberarmering ökar betongens draghållfasthet, vilket minskar risken för sprickbildning
- friktionen mellan betongplattan och dess underbyggnad påverkar deformationstillståndet och därmed spänningsfördelningen
- problemet med sprickbildning i tidig ålder accentuerades då flyttillsatser började användas.

Sanningsvärdet hos dessa påståenden kan vara högt, men det framgår ytterst sällan vilken typ av sprickor dessa teorier syftar på.

Oftast konstateras sprickbildningen ett dygn efter gjutning och då är det försent att kunna fastställa den verkliga orsaken till utvecklingen av sprickor. Med andra ord kan det vara svårt för den som rapporterar sprickorna att skilja på plastiska krympsprickor, vanliga krympsprickor, avsvalnings- och belastningssprickor.

Den s k plastiska krympningen, dvs den krympning betongen genomgår innan hårdnandet har påbörjat, uppstår då en nygjuten betong utsätts för tidig uttorkning. Torksprickor orsakade av plastisk krympning brukar uppstå 1-6 timmar efter gjutning. Betongens tillstyvnande, som kan betraktas som den viktigaste kraften som bromsar och stoppar den plastiska krympningen, fördröjs vid lägre temperaturer än 20 °C eller vid användning av flytmedel. I sådana fall kan torksprickor uppstå senare än 6 timmmar.

Orsaken till sprickbildning i mycket tidig ålder debatterades livligt på 60 och 70-talet, dock utan att leda till en fullständig förståelse av fenomenet. Man kom fram till att de viktigaste orsakerna är sättningsrörelser och plastisk krympning hos betongmassan, men när det gäller sambanden mellan materialparametrar och utvecklingen av sprickor är åsikterna ofta motstridiga [21]. Detta kan bero dels på att man inte fullständigt förstått mekanismen vid plastisk krympning och dels på mycket ringa kunskaper om betongens brottmekaniska egenskaper i tidig ålder.

En generell beskrivning av fenomenets komplexitet ges i [36]:

> "Sprickbildning som orsakas av såväl sättningar som plastisk krympning beror på flera material-, konstruktions- och miljöparametrar. Flera av dessa parametrar kan påverka å ena sidan deformations- och spänningstillståndet och å andra sidan utvecklingen av betongens töjbarhet och hållfasthet. Det är därför inte alltid så enkelt att förutsäga på vilket sätt en förändring av en parameter påverkar betongens sprickbildningsbenägenhet".

Man har förstått under årens lopp att betongen måste skyddas mot tidig uttorkning för att undvika plastiska krympsprickor och nästan helt gett upp tanken på att klarlägga detta inveklade fenomen. Problemet är att man inte alltid kan på ett tillfredställande sätt skydda betongen och att sprickbildning kan inte undvikas hos vissa betongsammansättningar trots noggrann efterbehandling. Den sist nämnda företeelsen verkar ha varit drivkraften för omfattande forskning rörande plastisk krympning hos höghållfast betong i Norge. Dock har mekanismen hos plastisk krympning och sprickbildning hos betong förblivit mer eller mindre en gåta. Man blir alltid lika överraskad och undrar om det har gjorts något fel då en betongplatta spricker efter några få timmar från gjutning.

Wittmann [38] och Radocea [31,32] visade experimentellt att orsaken till betongens plastiska krympning är utvecklingen av kapillära krafter som uppstår då en nygjuten betongmassa är utsatt för tidig uttorkning. Betongmassans sammandragning beror på att blandningsvattnet utsätts för tryck som är lägre än det atmosfäriska trycket.

Vid Institutionen för byggnadsmaterial, Chalmers Tekninska Högskola, har en mätmetod för kontinuerlig mätning av porvattentryck i nygjuten cementpasta och betong utvecklats. En licentiatuppsats "Porvattentryckmätningar i cementpasta: mätmetod, preliminära modeller och parameterstudier" (P-91:5 CTH) behandlar framtagandet och utvärderingen av denna mätmetod.

Den ovan nämnda mätmetoden användes under 1991-92 för att studera utvecklingen av plastisk krympning hos cementpasta. Detta arbete redovisades 1993 i en doktorsavhandling "A study on the mechanism of plastic shrinkage of cement-based materials". En modell som beskriver sambandet mellan viktförlusten på grund av avdunstning, undertycket i porvattnet, cementpastans egenskaper och plastisk krymning lades fram och verifierades för cementpasta. Modellen gäller för relativt små provkroppar som utsätts för måtliga avdunstningshastigheter och kan därför inte beskriva t ex ojämn krympning hos betong.

Som forskare måste man utgå från två viktiga betongbyggnadstekniska frågeställningar:

1. är det möjligt att utveckla betongsammansättningar som är mycket mindre känsliga för tidig uttorkning, utan stora förändringar i delmaterialens egenskaper eller arbetsutförandet?
2. vilken är den lämpligaste efterbehandlingen för de betongsammansättningar som måste skyddas mot tidig uttorkning?

Detta projekt, som är en naturlig fortsättning av tidigare arbeten, behandlar plastisk krympning och sprickbildning hos normal betong, dvs betong med vattencementtal större än 0,5.

1.2 Syfte

Projektets syfte är att svara på frågan om sprickbildning hos betong i tidig ålder är ett utförande- eller materialproblem.

Projektets experimentella del är inriktad på att undersöka eventuella samband mellan plastisk krympning/sprickbildning och miljö- och materialparametrar. Då sådana samband tagits fram kan man gå vidare och utarbeta hjälpmedel och tumregler för att bedöma risken för sprickbildning samt utveckla metoder för att motverka sprickbildningen. Utveckling av nya betongsammansättningar och metoder för bearbetning och efterbehandling, som minimerar risken för sprickbildning, ingår också i projektet.

1.3 Genomförande

Projektets mål kan uppnås genom att:

1. beskriva mekanismen vid plastisk krympning, dvs ta fram de viktigaste parametrar som styr utvecklingen av plastisk krympning
2. beskriva mekanismen vid sprickbildning, dvs förklara uppkomsten av dragspänningar och sprickor då betongmassan eller delar av den utsätts för tryckspänningar
3. undersöka de lämpligaste metoderna för att motverka sprickbildningen.

Framtagandet av en beräkningsmodell som kan användas för att förutsäga när och hur en viss betong, som placeras i en viss form och som utsätts för vissa klimatförhållanden, kommer att spricka kräver fortsatt forskning. Speciellt krävs forskning rörande betongens brottmekaniska egenskaper före och efter tillstyvnandet.

Projektet inleddes med omfattande litteraturstudier och en enkät, som skickades till arbetsledare i Göteborgsområdet.

Laboratorieundersökningarna omfattar studier av oförhindrad plastisk krympning och sprickbildning hos betong, bruk och pasta. Följande parametrar undersöktes:

- sammansättning:
  - cementtyp och malfinhet
  - vattencementtal
  - volymandel pasta (cementhalt)
  - flytmedel
  - tillsatsmaterial (silika och fiber)

- lagringsbetingelser:
  - fri avdunstning med måtliga och låga avdunstningshastigheter
  - vattenlagring
  - membranhärdning (plastfolie och membranhärdare)

Några fältmätningar, då avdunstning och vattentryck bestämdes, kompletterar den experimentella delen.

2 Enkät

Projektet inledes med en enkät som skickades ut till 21 arbetsledare i Göteborgsområdet. Enkätformulären och sammanställningen av erhållna svar visas i Tabell 2.1

Tabell 2.1 Enkätformulär och sammanställning av svaren

FRÅGA			SVAR
1.	Vid hur många byggen har du haft problem med sprickbildning hos betong i tidig ålder, dvs upp till ca 8 timmmar efter gjutning		• 2-4 st • sommarbygge • 50 % • i princip alla sedan 1980
2.	Typ av platta:	platta på mark bjälklag plattans tjocklek voter	☒ ☒ 8-100 cm ☒
3.	Arbetsutförande		
	Utläggning av betong:	pump bask ränna	☒ ☒ ☒
	Vibrering:	stav+sludda+laser vibrobalk	☒ ☒
	Svårigheter vid gjutning:		• 86 % inga • grov och tät armering • ofta mycket finmaterial i ytan • betongen härdar för fort
4.	Klimatförhålanden:	årstid temperatur solsken, mulet fukt vind	• april-oktober • +5..+25 °C • måtlig till stark (upp till 10 m/s)
5.	Efterbehandling:	täckning membranhärdning vattenbegjutning	☒ ☒ ☒

De övriga observationer visas i Tabell 2.2.

Tabell 2.2 Sammanställning av övriga observationer

	Omfattning	Beskrivning	Tid efter gjutning (tim)	Klimat-förhållanden	Andra observationer
1	samma som överkantsarmering	ner till 5 cm djup	6	vår, +19°C, 6 m/s	
2	hela ytan	små, 20 cm långa	3-4	sommar, >+20°C	
3	fler i voter och kantbalk		<12		alla sedan 1980, flyttillsatser
4	ganska omfattande		några	april-oktober, 5-25 °C, vind	
5	små sprickor trots täckning och vattenbegjutning		2-8		
6	riklig	hårsprickor till mm	3-5	vår-sommar, 8-25 °C, vind	ytbearbetning har betydelse: glättning ger finare sprickor (filigran bjälklag)
7	fina sprickor som ökar i storlek med tiden	rätvinkligt mönster, hela plattan	4-6		tunnt skinn på ytan trots riktig efterbehandli ng
8	mycket stor omfattning	genomgående & ytsprickor	3-5	förvår, 10 °C, 5-10 m/s	

En sammanfattning av enkäten lyder som följande: alla typer av sprickor kan utvecklas var som helst och när som helst, nästan oavsett betongsammansättning och efterbehandling. Detta undestrycker problemets omfattning och behovet att klarlägga mekanismerna vid plastisk krympning och sprickbildning.

3 Problemställning och litteraturstudier

I Fig. 3.1 sammanställs de viktigaste parametrar som påverkar den plastiska krympningen och utvecklingen av torksprickor.

En beräkningsmodell, som beskriver sprickbildningen hos t ex betongplattan i Fig 3.1, skall kunna ge svar på frågor av följande typ:

1. Hur ser sprickbildningen ut då betongplattan gjutits med en betong K30 (med känd sammansättning och egenskaper) och avdunstningshastigheten är ca 2 kg/m^{2}h?
2. Vilken är den största avdunstningshastighet som betongplattan kan klara utan sprickbildning?
3. Vilken betongsammansättning skall användas för att undvika torksprickor?
4. Under hur lång tid från gjutning måste en betongplatta skyddas för att undvika torksprickor?
5. Skall man, för att undvika torksprickor, använda vattenbegjutning eller är det bättre om en viss membranhärdare används?

I detta kapitel vill jag visa att, med dagens kunskaper och brist på mätmetoder, är det omöjligt att ge några entydiga svar på dessa frågor.

I [1] och [34] redovisas ett stort antal forskningsresultat rörande betong i tidig ålder. När det gäller den plastiska krympningen finns det dessutom flera litteraturstudier: [21], [23] och [36]. Forskningsresultaten är oftast av typen "empirisk kunskap" som inte ökar förståelsen för orsakssammanhanget (de gäller bara precis för de betongsammansättningar och klimat man undersökt). I brist på en modell som beskriver mekanismen vid uppkomsten av torksprickor, är det ganska förståeligt att forskaren väljer att studera hur sprickbildningsbenägenheten påverkas då en eller två parametrar varieras.

För att kunna förstå varför man inte lyckats beskriva utvecklingen av torksprickor på ett tillfredställande sätt och framför allt för att belysa fenomenet, skall dagens kunskapsnivå granskas. Genom att sammanslå problemställningen med mina tidigare erfarenheter, som ständigt relateras till andras forskningsresultat, hoppas jag kunna skapa den röda tråden, som så ofta saknas i litteraturundersökningar.

3.1 Sättning och plastisk krympning

Färsk betong med god arbetbarhet är ett system som består av en partikel fas (cement, filler och ballast) och en kontinuerlig vätskefas (blandningsvatten). Hos styva konsistenser räcker inte blandningsvattnet till att fylla hålrummen mellan fasta partiklar och vätskefasen är därför diskontinuerlig.

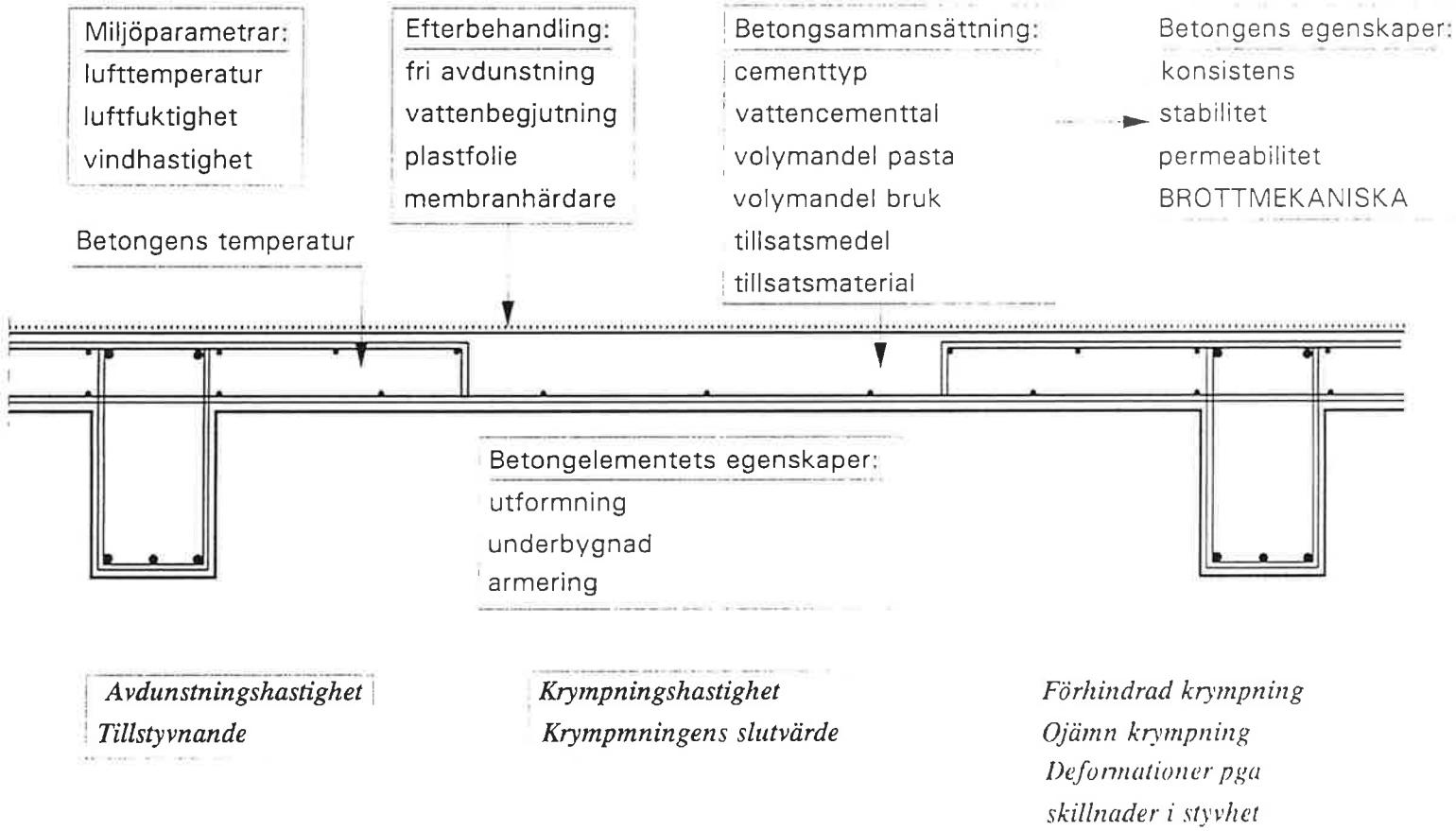


Fig. 3.1 Parametrar som påverkar plastisk krympning och sprickbildning

Sättningsrörelser beror på att betongen ej förmår att hålla kvar allt blandningsvatten, vilket leder till att cement och ballast sedimenterar, medan en del av blandningsvattnet stiger uppåt och samlas på betongmassans överyta. Sättsprickor kan även uppstå då betongens överyta är täckt med vatten.

Plastisk krympning är den volymminskning som startas då vattenmenisker (små krökta vattenytor) bildas på betongytan på grund av tidig uttorkning. Vattenmeniskerna ger upphov till kapillära krafter som transporterar en del av blandningsvattnet upp till ytan och följaktligen åstadkommer en sammandragning av den färska betongmassan [32].

Både sättning och plastisk krympning kännetecknas av att mängden blandningsvatten minskar, vilket resulterar i en konsolidering av det fasta materialet. Denna konsolidering är möjlig då den nygjutna betongen kan deformeras. Den viktigaste skillnaden mellan sättning och plastisk krympning är drivkraften för betongens avvattning: gravitation för sättning och kapillära krafter för plastisk krympning.

Det kan påstås att sprickbildningen hos nygjuten betong orsakas av förhindrade deformationer eller deformationsskillnader i betongmassan. I Fig. 3.2 visas fem exempel på deformationstillstånd som kan ge upphov till utveckling av sprickor. Fig. 3.2.1 och 3.2.2 gäller för både sättning och plastisk krympning. Fig. 3.2.3, 3.2.4 och 3.2.5 gäller för plastisk krympning.

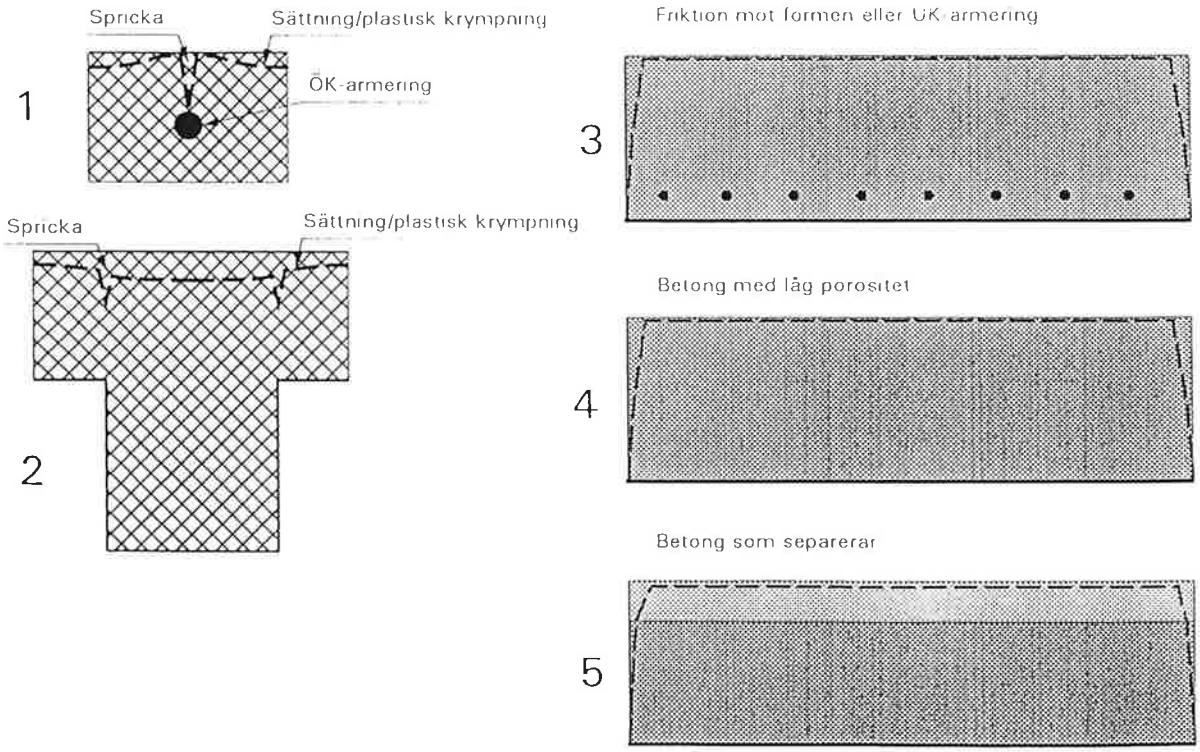


Fig. 3.2 Exempel på möjliga deformationstillstånd i nygjuten betong.

För att en spricka skall uppstå måste antingen brottöjningen eller draghållfastheten överskridas, vilket innebär att dragspänningar måste utvecklas i betong. Spänningstillståndet bestäms av krympningens storlek, graden av tvång och betongens mekaniska egenskaper.

I fortsättningen diskuteras:

1. Mekanismen vid plastisk krympning
2. Spännings- och deformationstillstånd i nygjuten betong
3. Betongens struktur i tidig ålder
4. Mekaniska egenskaper hos betong i tidig ålder
5. Risken för sprickbildning

3.2 Mekanismen vid plastisk krympning

Enligt [1] kan plastisk krympning inte betraktas som en av betongens egenskaper så som t ex kemisk krympning. Detta beror på att plastisk krympning inte är en funktion av endast delmaterialens egenskaper och blandningsproportioner utan också av uttorkningshastighet [10]. I [23] jämförs avvattningen genom tidig uttorkning med vakuumsugning, vilket är helt rimligt om man bortser från hastigheten hos avvattningen. En viktig fråga ställs i [34], nämligen på vilket sätt påverkas krympningen av samspelet mellan betongens egenskaper och klimatförhållandena.

I [32] utvecklades en modell som beskriver den plastiska krympningens tidsberoende hos cementpasta. I denna modell antas krympningen vara ekvivalent med två simultana vattentransporter: en från provets överyta till omgivningen (avdunstning) och den andre från provets inre till ytan (avvattning).

Under den plastiska krympningen är den totala deformationen praktiskt taget ekvivalent med volymen avdunstat vatten, vilket kan förklara varför den plastiska krympningen under de första 3-5 timmarna kan bli 0.4-1.1 % [33] eller 7-10 ggr större än långtidskrympningen [4].

Kraftjämvikten i ett prov utsatt för kapillära krafter kräver att undertrycket i porvattnet balanseras av ett övertryck (tryckkrafter) på skeletet som består av det fasta materialet. Hos cementpasta beror skeletets styvhet huvudsakligen på avståndet mellan cementpartiklarna, dvs vattencementtal och ålder. Låg styvhet hos höga vattencementtal är en av förklaringarna även för vattenseparation.

Enligt modellen i [32] styrs den fria krympningen av avdunstningshastigheten och utvecklingen hos porvattenundertrycket samt av porstrukturen hos överytan, krympmodulen och provets tjocklek. Modellens nyhet består i att den plastiska krympningen beskrivs som en process och framför allt i att man lyckats få fram rimliga variabler. Dessa variabler diskuteras i fortsättningen mer ingående. Modellen verifierades för cementpastor, samt blandningar av mikrosilika och flygaska med vatten.

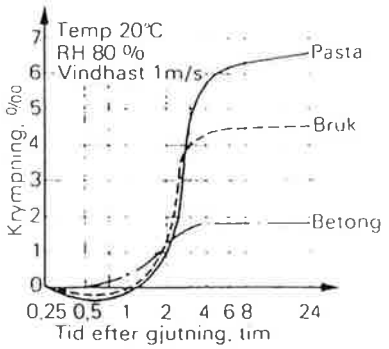
En av de viktigaste slutsatserna i [32] är att den totala plastiska krympningen hos cementpasta är ekvivalent, under tiden då vattenmeniskerna håller sig nära ytan, med volymen avdunstat vatten.

På grund av flera förenklingar, kan modellen i [32] inte beskriva deformationstillståndet i alla punkter i t ex betongplattan i Fig. 3.1. En preliminär modell som tar hänsyn till följande faktorer diskuteras i kapitel 4:

1. skillnaden mellan vertikal och horisontell krympning
2. ojämn krympning (deformationsskillnader mellan olika skikt)
3. inverkan av ballast och orörliga punkter som t ex armering
4. strukturförändringar orsakade av hydratation, dvs betongens övergång från ett plastiskt till ett elastiskt material
5. krympningen då vattenmeniskerna sjunker in i betongmassan
6. utvecklingen av dragspänningar i betongmassan och därmed sprickbildningen.

Man kan med hjälp av gamla försöksresultat göra sig en uppfattning om skillnaden mellan krympningen hos pasta och krympningen hos bruk och betong. I Fig. 3.3.a visas ett exempel på plastisk krympning hos pasta, bruk och betong. Enligt diagrammet är krympningen vid 4 timmar 0,57% hos pasta, 0,43% hos bruk och 0,18% hos betong. Blockdiagrammet i Fig. 3.3.b visar sammansättningar för en K25 och en K110.

Om pastans krympning på 0,57% helt omvandlas till krympning hos bruk och betong enligt recepten i Fig. 3.3.b fås följande resultat: 0,4-0,5% hos bruk och 0,24-0,3% hos betong. Detta stämmer ganska bra överens med diagrammet i Fig. 3.3.a. Att betong krymper mindre än pasta beror alltså i första hand på delmaterialens proportioner och inte på att ballasten motsätter sig krympningen. Detta påstående skall inte uppfattas som att ballastmängden inte påverkar betongens sprickbildning.



Exempel på plastisk krympning Vironnaud (1960)

a.

	K25	HPB
Cement	250	450
Vatten	160	149
Sand	965	762
Sten	985	1053

b.

	K25	HPB
volym pasta	0,24	0,295
volym bruk	0,6	0,585
volym betong	0,97	0,985

Fig. 3.3 Plastisk krympning hos pasta, bruk och betong.

3.2.1 Avdunstningshastighet

Avdunstningen från betongens överyta bestäms av klimatförhållandena (lufttemperatur, luftfuktighet och vindhastighet) och betongytans temperatur [2].

Enligt [23] spelar andra betongparametrar, så som porstrukturen vid ytan och hela kapillärsystemet, en stor roll för avdunstningens storlek. Ett kapillärsystem som lätt kan försörja ytan med vatten, dvs små avstånd mellan partiklarna, kan leda till större avdunstningshastighet än betongblandingar med betydlig vattenseparation. Ett sådant exempel är betong med silika [23].

Preliminära egna resultat indikerar att blandningar av högflytande konsistens, erhållen med hjälp av flytmedel, bibehåller en hög avdunstningshastighet under en längre tid än blandingar av styvare konsistens. Det är mycket sannolikt att andra parametrar så som mängd ballast, cementhalt och cementsort också påverkar avdunstningen.

Det finns flera aspekter som måste betraktas när det gäller ett samband mellan plastisk krympning och avdunstningshastighet. För det första är det ganska rimligt att anta att krympningshastigheten under det plastiska tillståndet är proportionell mot avdunstningshastigheten. För det andra påverkar avdunstningen både vattentransporten till ytan och betongens tillstyvnande, vilket kan leda till olika fall:

1. Vid höga avdunstningshastigheter, och speciellt vid betongtyper med låg permeabilitet (lågt vattencementtal), hinner inte blandningsvattnet från hela betongmassan transporteras till ytan, vilket ger upphov till tryckgradienter. Krympningen vid ytan är då störst och ytsprickor kan uppstå.

2. Vid låga avdunstningshastigheter, och speciellt vid betong med hög permeabilitet (normal betong), bör krympdeformationerna vara mer homogena, vilket kan ge upphov till grövre genomgående sprickor.

3. En lågpermeabel betong utan nämnvärda temperaturgradienter tillstyvnar snabbare vid ytan. Detta kan resultera i att styvheten hos en betongplatta varierar med avståndet från ytan.

3.2.2 Avdunstningsyta

Det är vid betongens överyta, som vattenmenisker vanligen brukar bildas. Hos vattenlagrad, höghållfast betong är det möjligt att de första vattenmeniskerna uppstår ett visst avstånd från ytan.

Vattenmeniskernas krökningsradie och läge i förhållande till ytan beror dels på betongytans porstruktur och dels på avdunstningen och avvattningen mot överytan. Vid små porer räcker det med låg avdunstning för att få stora förändringar av porvattentrycket.

3.2.3 Provets tjocklek

I Fig. 3.4 visas samband mellan porvattentryck, mängd avdunstat vatten och provets tjocklek hos cementpasta med vattencementtal 0,35 [32]. Enligt diagrammen är mängden avdunstat vatten proportionell mot provets tjocklek vid ett visst porvattentryck, vilket betyder att vid samma avdunstningshastighet utvecklas undertrycket snabbare i ett tunnare prov.

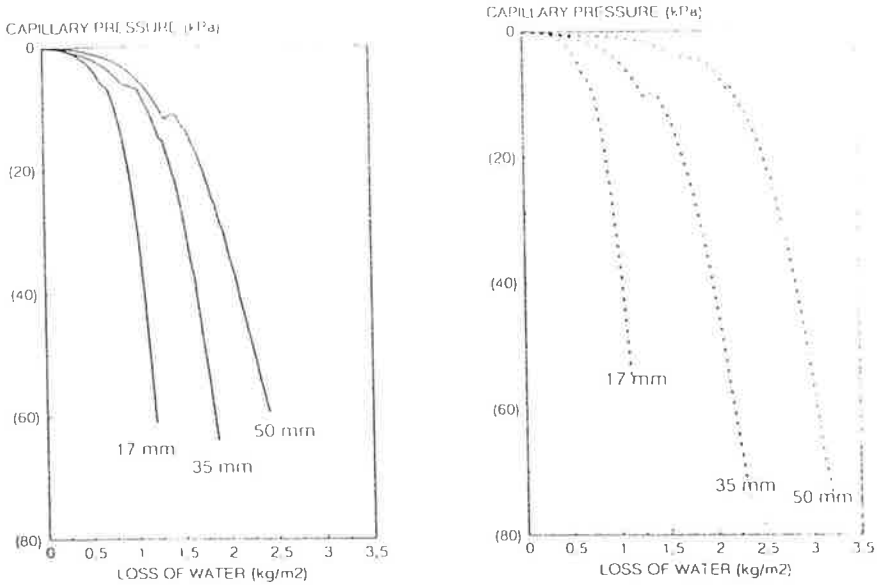


Fig. 3.4 Vattentryck i prover med olika tjocklekar (cementpasta med W/C=0,35) vid två avdunstningshastigheter.

I [1] efterlyses en modell som beskriver ballastens funktion; om man skall kunna uppskatta sprickrisken hos betong med utgångspunkt från cementpastans krympning. Detta verkar vara helt rimligt med tanke på att det är cementpastan och fasgränsen (!) mellan ballast och cementpasta som avvattnas och följaktligen krymper, se också tankegången baserad på Fig. 3.3.

Egna försöksresultat visar däremot att undertrycket i porvattnet utvecklas tidigare i betong än i pasta med samma vattencementtal, vilket gör att resultaten från pasta och betong är ojämförbara pga cementets hydratation. Det händer så mycket på så kort tid hos nygjuten betong att plastisk krympning och speciellt sprickbildning hos betong måste studeras på betong.

Både modellen i [32] och de övriga undersökningar visar att mängden sand, sten och pasta spelar en avgörande roll i utveckingen av plastisk krympning. Vid en viss avdunstningshastighet krymper en betong med mindre mängd pasta mindre på grund av att den tillstyvnar tidigare än en betong med större mängd pasta.

För att kunna beskriva krympningen hos betongplattan i Fig. 3.1 måste utvecklingen av vattentryck studeras dels som funktion av ballastmängden och dels som funktion av plattans tjocklek.

Enligt [34] minskar den plastiska krympningen avsevärt när ballastmängden ökar, vilket beror på att då finns det mindre mängd vatten som kan avvattnas och en styvare struktur på ballastens nivå. I [7] dras slutsatserna att sprickbildningsbenägenheten ökar när pastans volym minskar eller när sandmängden ökar. Det antyds också att den perfekta betongen består av endast pasta och grov ballast. Tyvärr bestämdes sprickbildningen först efter 20 timmar från gjutning, så det är svårt att veta om sprickorna orsakades av plastisk krympning, kemisk krympning eller temperatur-skillnader.

3.2.4 Krympmodul

Krympmodulen hos en betongsammansättning beskriver undertrycket som krävs för att en viss mängd vatten skall transporteras till ytan och den är beroende av cementpartiklarnas rörlighet i förhållande till varandra och pastans permeabilitet. Krympmodulen kan jämföras med betongens sugbarhet vid vakuumbehandling (låg krympmodul=bra sugbarhet) eller med kompressionsmodulen hos lera. En betong med hög initialporositet kräver låga kapillärkrafter för att vattnet skall transporteras till ytan.

Krympmodulen påverkas av många parametrar:

1. initialavstånd mellan cementpartiklar:
   - vattencementtal
   - dispergeringsgrad
   - cementsort
   - cementets malfinhet
2. hydratation
   - cementsort och malfinhet
   - cementets ålder
   - temperatur
3. tillsatsmedel
4. tillsatsmaterial

Enligt [32] påverkas krympningen hos cementpasta av både själva krympningen (genom konsolidering) och tillstyvnande. I det plastiska tillståndet ökar krympmodulen proportionellt mot vattentrycket, dvs kraften som krävs för att avvattna cementpasta ökar då avståndet mellan cementpartiklar minskar.

Sprickbildningsbenägenheten ökar dramatiskt då ett kritiskt vatten-bindemedelstal underskrids [7]. Det är emellertid ovisst vad det var som orsakade sprickorna (uppmätning av sprickor skede efter 20 timmar från gjutning). I [22] kunde man inte hitta ett samband mellan cementhalt och plastisk krympning. Cementets malfinhet ökar den plastiska krympningen [34].

Alla tillsatsmedel, som påverkar den färska betongens styvhet (konsistens), påverkar också krympningen [38]. Ödometerförsök utförda i [32] visar att mer vatten kan pressas ut ur cementpasta med flytmedel än utan flytmedel. Dessutom de flytmedel som har en retarderande effekt fördröjer tillstyvnandet och följaktligen förlänger tiden under vilken betongen deformeras plastiskt.

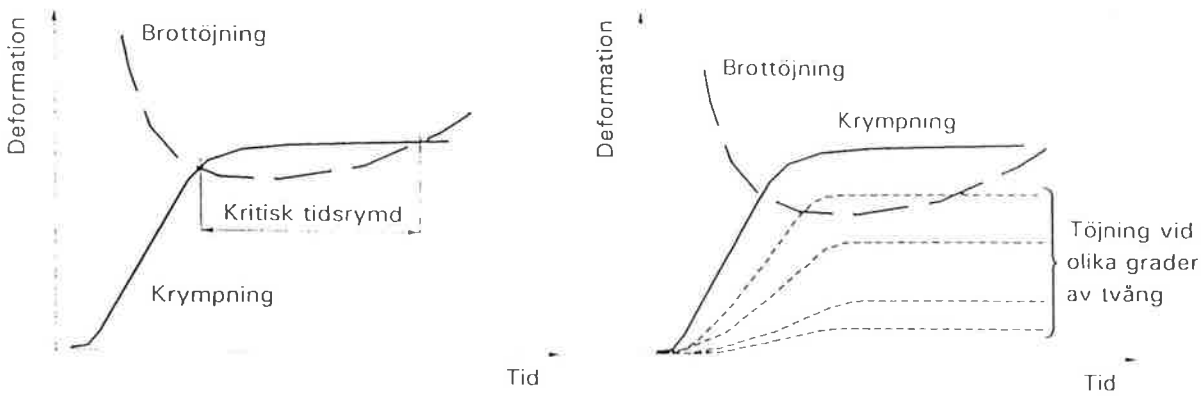
Effekten av hydratation diskuteras mer ingående i avsnitt 3.4.

Övergången från en hög till en låg deformationshastighet markerar en drastisk förändring av krympmodulen. Enligt [33] uppstår den första spricka just i detta skede. Inverkan av betongens sammansättning och tillstyvnande på krympmodulen är därför ytterst viktig vid modellbyggandet.

Det är också viktigt att inse att krympmodulen kan ha stora lokala variationer som gör att krympningen inte är jämt fördelad i hela betongmassan. Då betongen är utsatt för ett visst undertryck kommer områdena med större porositet att krympa mer än de med lägre porositet. Exempel på sådana områden är: överskiktet hos separerad betong, vattenfickor under ballastkorn, fasgränsen mellan pasta och ballast, samt defekter av olika slag. Krympmodulens variation i en betongmassa kan ha stora konsekvenser för utvecklingen av sprickor. Även uppkomsten av sprickor som utvecklas inifrån kan då få en rimlig förklaring.

3.3 Spännings- och deformationstillstånd i nygjuten betong

I Fig. 3.5.a vissas en modell, som man oftast finner i litteraturen, och som skall beskriva sprickkriteriet vid plastisk krympning. Enligt modellen är risken för sprickbildning störst då krympningen överstiger betongens brottöjning. Tyvär gäller den i ett ända fall, nämligen då krympningen helt kan förhindras. I själva verket är töjningen i betong beroende av graden av tvång och betongens styvhet (betongens relaxation motverkar uppkomsten av dragspänningar). En mer realistisk modell vissas i Fig. 3.5.b



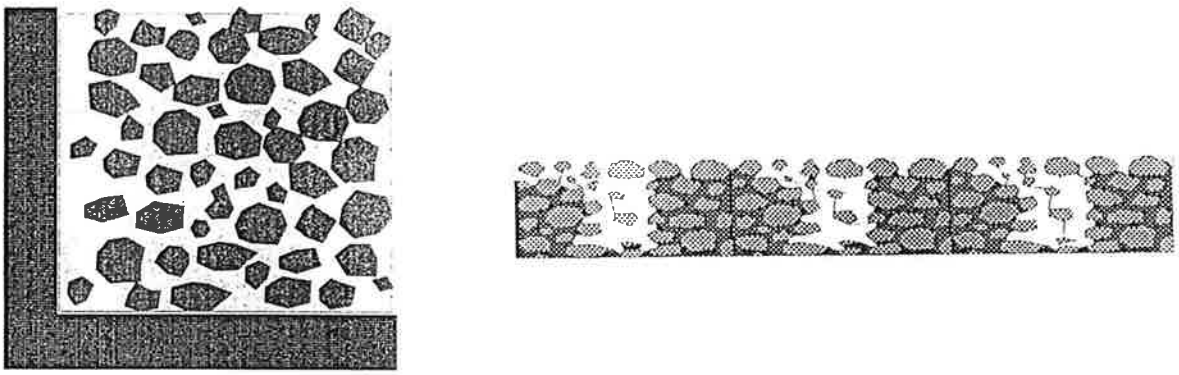
a. b.

Fig. 3.5 Modeller för sprickbildning.

Enligt [29] och [33] kan sprickor uppkomma då dragspänningar, som uppstår i betong på grund av förhindrad krympning, överstiger betongens draghållfasthet. Detta sprickkriteriet motiveras i [29] genom att visa att reserven med avseende på hållfasthet är lägst vid ca 3,5 timmar medan reserven med avseende på deformation är lägst vid ca 6 timmar. Modellen i Fig. 3.5.a förekommer oftare i litteraturen pga det är praktiskt enklare att mäta deformationer än spänningar.

För att kunna ta fram ett realistiskt sprickkriterium bör man först förstå under vilka omständigheter kan dragspänningar uppstå i betongen.

Då undertryck utvecklas i porvattnet, utsätts skeletet som består av fasta partiklar för tryckkrafter. Dessa tryckkrafter konsoliderar det fasta materialet och kan därför inte starta sprickbildningen, vilket gäller då blandningsvattnet utgör en kontinuerlig fas. Det kan däremot finnas områden i betongmassan där porositeten är störst, dvs avstånden mellan cementpartiklarna är störst. Om betong, som befinner sig i övergångsperioden från det plastiska till det elastiska tillståndet (avtagande krympningshastighet), utsätts för ett visst undertryck kan dessa områden tömmas på vatten pga att vattenmeniskerna inte kan hitta stabila lägen just där. I ett sådant område gäller inte längre kraftbalansen mellan undertrycket i vatten och trycket på fasta materialet, vilket gör att området kan utsättas för dragspänningar. Exempel på område med större initialporositet vissas i Fig. 3.6.



a. b.

Fig. 3.6 a. Randzonen mellan betong och form
b. "Defekter" i betonmassans överskikt.

Vid oförhindrad krympning hos relativt små provkroppar (mindre än 1 m enligt egna erfarenheter) uppstår de första sprickorna alltid i randzonen mellan betong och form, se Fig. 3.6.a. Detta kan bero på följande faktorer:

1. större initial porositet pga väggeffekten
2. dålig vidhäftning mellan betong och formvägg; även försök med formväggar av härdad betong ger sprickor i samma område
3. formväggen är orörlig i förhållande till cementpartiklarna; graden av tvång i randzonen är därför 100%.

Betongens överskikt är inte homogen utan den innehåller områden med större initialporositet, sk defekter. Då dessa områden töms på vatten, fortsätter omkringliggande betong att krympa och dragspänningar uppstår i de "torra" områdena, se Fig. 3.6.b. Man kan tänka sig att vid höga avdunstningshastigheter hinner inte vattnet transporteras till ytan och defekterna ger upphov till ytsprickor. Vid högpermeabel betong och låg avdunstning kan sådana defekter fungera som sprickanvissningar för genomgående sprickor.

Ett annat fall äger rum då avstånden mellan cementpartiklarna blir större pga rörelse skillnader i betongmassan, se Fig. 3.2. Fall 1 och 2 är exempel på vertikala rörelseskillnader. I de andra tre fallen genomgår betongens ytskikt större sammandragning än dess mitt- och bottenparti. Deformationstillstånden i Fig. 3.3 diskuteras ingående i kapitel 4.

Sammanfattningsvis kan sägas att det finns områden i betongmassan som "torkar" fortare och att i dessa områden kan dragspänningar uppstå. Sådana område kan uppstå även inuti betongmassan, vilket kan leda till att sprickor utvecklas inifrån.

En modell som beskriver mekanismen vid sprickbildning måste ta hänsyn till dels utvecklingen av betongens draghållfathet vid olika grader av avvattning och dels utvecklingen av dragspänningar som funktion av krympning.

3.4 Betongens struktur i tidig ålder

Ett antal författare anser att kemisk krympning bör inte förbises då man studerar den plastiska krympningen [1], medan andra tycker att förbrukningen av vatten genom hydratation kan inte räknas som en av de primära orsakerna till plastisk krympning [38].

I Fig. 3.7 visas schematiskt hydratationen och strukturutvecklingen hos cementpasta.

I början av viloperioden är cementkornen täckta av en tunn hinna som består av reaktionsprodukter som bildats under initialreaktionen. Omfattande kvantitativa undersökningar av cementpastans fysikaliska egenskaper under viloperioden visar att cementkornens antal, storlek och form förändras obetydligt av initialreaktionerna eller av de långsamma kemiska reaktioner som äger rum under viloperioden [30]. Cementkornen förblir därför fristående under viloperioden (åtminståne för vattencementtal större än ca 0,35). Viloperiodens slut markeras av att värmeutvecklingen ökar och av en ökad styvhet hos pastan.

Risken för sprickbildning är störst under bindning [29] eller under övergångsperioden från hög till låg krympningshastighet [33]. Under bindningstidens början dominerar hydratationen av C_3S som ger en förstyvning av cementpastan. Betongens tillstyvnande påverkas av: vattencementtal, vattenavgång, hydratation, temperatur och tillsatsmedel [2] och [29].

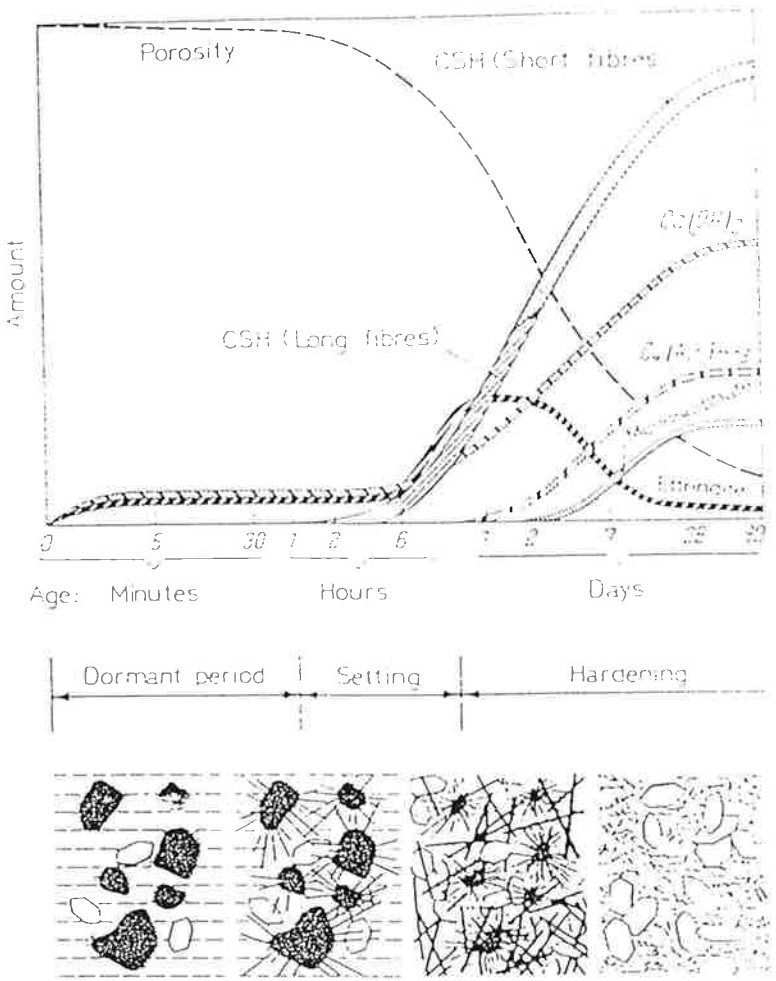
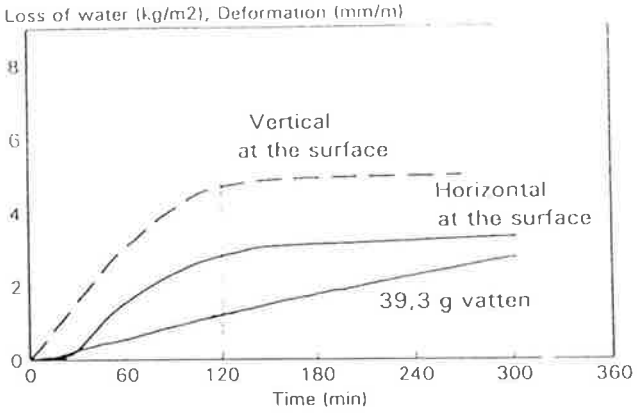
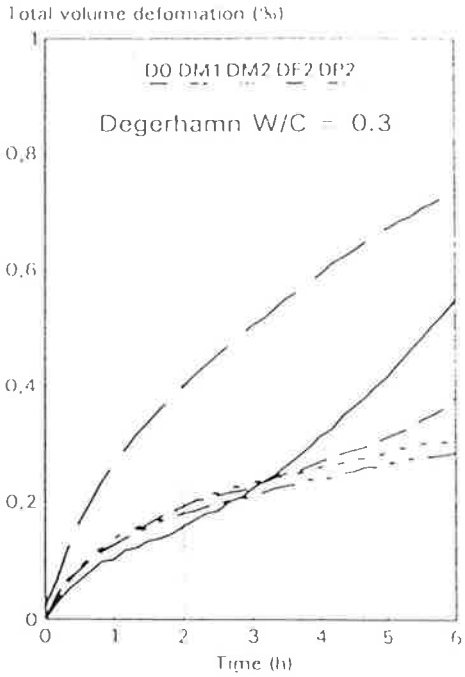


Fig. 3.7 Hydratationens utveckling, efter Locher och Richards (1975).

Tidigare egna resultat kan ge en uppfattning om de kemiska reaktionernas effekt på självuttorkning och tillstyvnande. Diagrammet i Fig. 3.8.a visar plastisk krympning och vattenavgång för en högpresterande betong utsatt för 1 m/s vindhastighet. I Fig. 3.8.b visas kemisk krympning hos Degerhamns cement bestämd genom mätning av total volymändring hos färsk cementpasta med W/C=0,3. Den plastiska krympningen avtar efter två timmar från gjutning då vattenavgången är 39,3 g/prov, vilket betyder 0,026 g vatten/g cement. Enligt Fig. 3.8.b är den kemiska krympningen hos pasta med 2% Flyt 92 lika med 0,4% vid två timmar (observera att Flyt 92 har en accelererande effekt på hydratationen). Detta innebär att självuttorkningen kräver 0,0027 g vatten/g cement. Avvattningen genom måtlig avdunstning är alltså 10 ggr större än avvattningen genom självuttorkning under de första två timmarna efter gjutning. Effekten av hydratation ökar senare men krympningen har en lägre storleksordning pga tillstyvnandet.





a. b.

Fig. 3.8 a. Plastisk krympning och vattenavgång genom avdunstning
b. Total volymändring orsakad av kemisk krympning.

Sambandet mellan krympning och porvattentryck hos samma högpresterande betong visas i Fig. 3.9. Enligt definition är betongens krympmodul [32] lika med kurvans lutning. Man kan observera att en dramatisk förändring av krympmodulen sker vid en deformation på ca 2,7 mm/m (ca 2 timmar efter gjutning).

Förändringen hos betongens styvhet, vilket påverkas av både avdunstning och hydratation, verkar ha större effekt på krympningens utveckling än avvattningen genom självuttorkning. Det är däremot fullt möjligt att, vid högre betongtemperaturer och speciellt när "varmt" cement används, självuttorkningen kan ha stor betydelse även några få timmar efter gjutning.

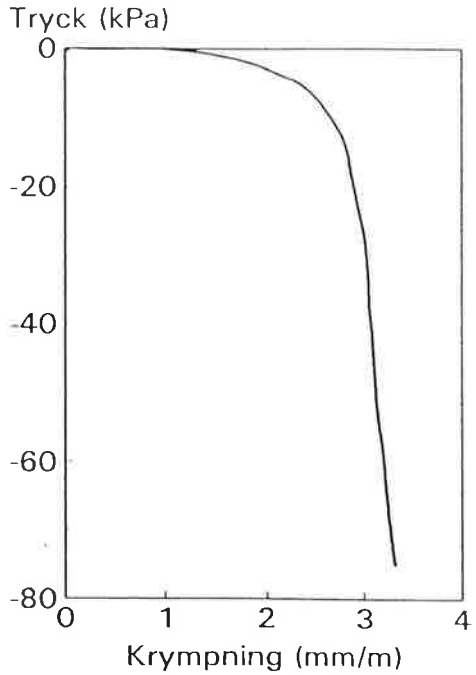


Fig. 3.9 Samband mellan vattentryck och krympning hos betong med Degermans anläggningscement.

3.5 Brottmekaniska egenskaper hos betong i tidig ålder

Det behövs kunskaper om betongens deformationsegenskaper (draghållfasthet, spännings-deformationssamband, elasticitetsmodul, krypning och deformationer i plastiskt tillstånd) för att kunna studera samspelet mellan förhindrade deformationer å ena sidan och spänningstillstånd och sprickbildning å andra sidan [34]. Kunskapsnivån, när det gäller brottmekaniska egenskaper, varierar enligt vissa författare från "några kunskapsluckor" [4] till mycket låg [10]. Denna situation kan bero på flera orsaker:

1. Det är mycket svårt att praktiskt bestämma mekaniska egenskaper hos betong i tidsintervalet 2-6 timmar efter gjutning.
2. Det är något enklare att undvika sprickbildning genom att använda olika åtgärder än att studera uppkomsten av sprickor i tidig ålder.
3. Hos nygjuten betong saknas det en oberoende variabel (som mognadsgrad hos hårdnad betong) som kan användas för att beskriva utvecklingen av intressanta egenskaper [34]. Denna variabel bör dessutom bestämmas med hjälp av en enkel mätmetod som kan användas ute på arbetsplatsen.
4. Man har inte riktigt förstått mekanismerna vid plastisk krympning och sprickbildning.

Det finns väldigt få försök inriktade på att bestämma mekaniska egenskaper hos betong i tidig ålder och då startas mätningarna nästan aldrig tidigare än sex timmar efter gjutning. Dessa försök kan ge en uppfattning om hållfasthetsutvecklingen men kan inte användas i samband med plastisk krympning som äger rum ett par timmar tidigare. Det är just övergången från plastiskt- till hårdnat tillstånd som är så viktig för den plastiska krympningen och som är så svårt att angripa.

Betongens brottöjning är minst vid en tryckhållfasthet av ca 3-5 MPa, vilket motsvarar en ålder på 12-16 timmar vid 20°C [4]. Enligt andra forskare har brottöjningen ett minimum mellan 6 och 12 timmar, se Fig. 3.10.

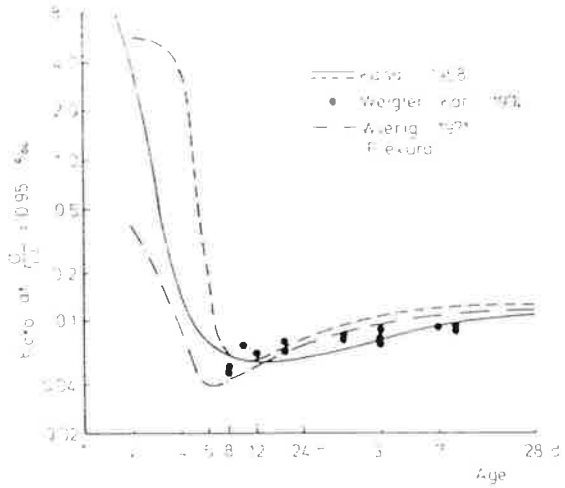


Fig. 3.10 Brottöjning hos betong i tidig ålder [5].

Det finns ett linjärt samband mellan enaxlig draghållfasthet och tryckhållfasthet [5], [6] och [34]. Draghållfastheten vid tidig ålder är 8-10% av tryckhållfastheten. Enligt [34] ökar tryckhållfastheten exponentiellt under de första dygnen. Hållfasthetsutvecklingen påverkas av cementsort, temperatur, vattencementtal och tillsatsmedel även i tidig ålder [34].

I [34] ges de krav som uppmätning av enaxlig draghållfasthet måste uppfylla. För närvarande finns det ingen standardiserad metod för bestämning av betongens hållfasthetsutveckling under viloperioden och bindetiden. Det finns flera skäl att ställa sig frågan om en sådan metod kan vara till stor hjälp vid uppskattningen av risken för sprickbildning:

1. plastisk krympning är en treaxlig deformation
2. förhindrad plastisk krympning ger upphov till en kombination av tryck- och dragbelastning som reducerar betongens hållfasthet
3. krympningshastigheten, och därmed belastningshastigheten, är beroende av avdunstning och betongens egenskaper
4. man vet ingenting om hur graden av tvång påverkar utvecklingen av dragspänningar i en betongmassa som ändrar tillstånd under loppet att 2-4 timmar

5. spänningstillståndet är beroende av hur blandningsvattnet är distribuerat och förflyttar sig i betongmassan.

Enligt [34] saknas det en oberoende variabel (som mognadsgrad hos hårdnad betong) som kan användas för att beskriva utvecklingen hos nygjuten betong. En sådan variabel är utan tvekan trycket i blandningsvattnet. Porvattentrycket är ett mått dels på hur mängden fritt vatten minskar och dels på hur det fasta materialet motsätter sig betongens avvattning. Sambandet i Fig. 3.9 representerar egentligen betongens arbetskurva vid en belastningshastighet som är styrd av avdunstningen. Porvattentryckets tidsberoende, se Fig. 3.11, är ett mått på utvecklingen hos treaxlig tryckhållfasthet som styrs av både tidig uttorkning och hydratation. Dessutom kan metoden för mätning av porvattentryck användas i labmiljö och i fält [32].

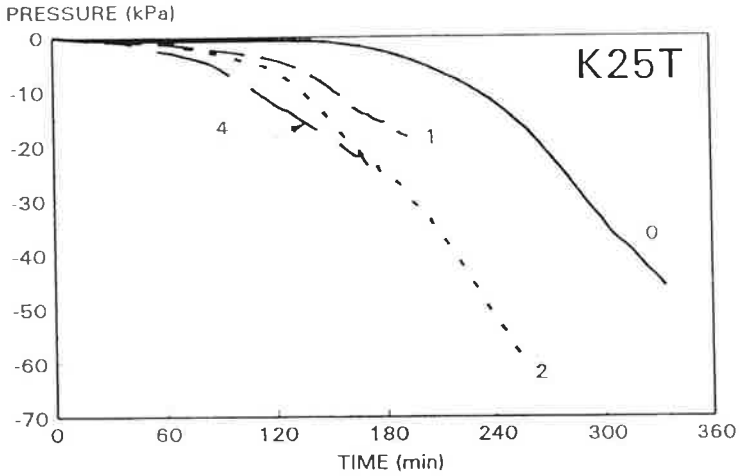


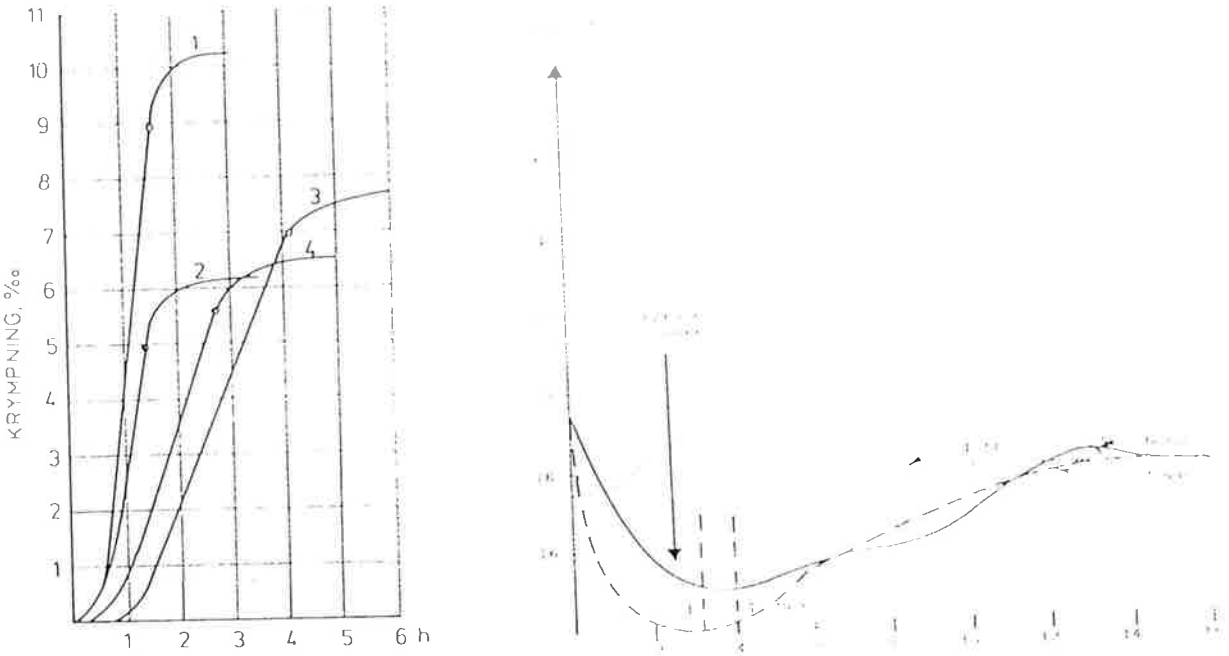
Fig. 3.11 Porvattentryck vid olika vindhastigheter (ca 23°C), betong K25.

En viktig fråga är om det finns ett samband mellan utvecklingen av tryckhållfasthet, som kan bestämmas genom mätning av vattentryck, och utvecklingen av betongens draghållfasthet. Om man jämför Fig. 3.10 med 3.11 verkar det som att brottöjningens minimum vid 4-6 timmar motsvaras av ett högt vattentryck. En snabb ökning av vattentrycket, som äger rum innan det maximala trycket uppnås, indikerar att vattenmeniskerna sjunker i betongmassan. Detta skede markerar tiden då vattensystemet blir diskontinuerligt eller tiden för betongens övergång från ett plastiskt till ett sprött material. Det är uppenbart att, om hydratationen inte har kommit såpass långt att avstånden mellan cementkornen överbryggas av reaktionsprodukter, motsvaras vattnets diskontinuitet i betongmassan av ett ett minimum hos brottöjningen.

Det finns ett problem när det gäller mätning av vattentryck på ett enda djup, nämligen att hos betong med låg permeabilitet är tryckfallshastigheten störst vid ytan. En mätning på 4-10 cm avstånd från ytan ger därför inte en bra uppfattning om vad som händer vid ytan. Vattentrycket måste därför bestämmas på två olika djup.

3.6 Risken för sprickbildning

Det finns endast två undersökningar [23] och [33] där man redovisar sprickor orsakade av plastisk krympning; det anges även tiden då första sprickan upptäcktes, se Fig. 3.12. I de flesta undersökningar [3], [13]-[17] och [36] uppmätes sprickbildningen först efter ca 24 timmar och då är det ganska orimligt att endast skylla på plastisk krympning när det händer mycket annat under de första 24 timmarna (kemisk krympning och temperaturrörelser)



Krympning vid varierande exponeringsförhållanden
Cementbruk, C = 550 kg/m³. Ravina, Shalom (1968)
Med ring har utmärkts tidpunkten för första synliga spricka

Fig. 3.12 Tiden för uppkomsten av första sprickan.

Sprickor orsakade av sättningsrörelser behandlas i [2], [12], [18] och [35]. Sprickorna uppträder vanligtvis 1-2 timmar efter gjutning och uppvisar ofta ett regelbundet mönster [2]. Enligt [12] minskar sprickbildningsbenägenheten med ökat täckskikt, samt mindre armeringsdiameter och sättmått. I [35] kunde man inte hitta en faktor som var avgörande för sprickbildningen. Ändpunkten på sättsprickor är rund och sprickkanterna passar inte alltid ihop [18].

Sprickor orsakade av plastisk krympning uppkommer normalt 1-3 timmar efter gjutningen och de är ofta raka, utan särskild orientering [2]. Ändpunkten på sprickor är mycket skarp och sprickkanterna är parallella och passar perfekt ihop [18].

Avdunstningshastigheten från betongytan har en avgörande roll, dvs ju högre avdunstning desto större risk för sprickbildning [23], [33] och [34].

Det finns ändå fall då sprickor uppstår under fri vattenyta [3] och [10]. Det är svårt att tro att mekanismen vid utvecklingen av sådana sprickor kan vara likvärdig med den för vanliga torksprickor. Man kand däremot tänka sig att en vattenmättad betongyta som utsätts för avdunstning kan ha 5-10°C lägre temperatur än betongens mittparti, vilket kan ge upphov till rörelseskillnader pga självutttorkning. Vid användning av lämplig membranhärdare eller täckning med plastfolie kan kanske sådana sprickor undvikas. Då förhindras avdunstningen utan att kraftiga temperaturskillnader uppstår i betongmassan.

Risken för sprickbildning är störts under bindning eller övergången från hög till låg kympningshastighet [23], [29], [33] och [34], vilket kan förklaras av att:

1. draghållfastheten är låg
2. betongens spänningsrelaxation minskar pga bindning och därmed ökar graden av tvång
3. vattenmeniskerna hittar inte längre stabila lägen vid ytan och sjunker i betongmassan
4. tryckfallshastigheten ökar, vilket leder till att områden med större porositet töms på vatten.

Det är meningslöst att försöka systematisera betongparametrarnas effekt på sprickbildningsbenägenheten då i de flesta undersökningar dessa parametrar varieras vilt. I [7] är man mycket noga med betongparametrarna hos höghållfast betong men det är svårt att veta vad det är för sprickor man uppmäter. Slutsatserna i [7] är mycket viktiga och bör därför verifieras i samband med undersökning av plastisk krympning:

1 "When the W/(C+S) ratio is decreased (at a constant paste volume) there is a "critical" W/(C+S) (0.36) below which the cracking tendency increases dramatically

2 When the paste volume is decreased (at a constant W/(C+S)) there is a strong increase in cracking tendency below the "critical" value.

3 When the sand content is increased at the expence of the coarse aggregate (at a constant paste volume and W/(C+S)) there is an increase in cracking tendency."

Användning av mikrosilika ger stabila betongblandningar som resulterar i att betongytan blir torr strax efter gjutning. Kapillärporerna är mindre i en sådan betong, vilket gör att även lägre avdunstningshastighet ger upphov till stora undertryck. Risken för sprickbildning ökar när silika används [23].

Ett fullskaleförsök [9] visar att sprickbildningen är störst då betongplattan gjutits på plastfolie (?), men sprickorna uppmätes efter 52 veckor.

Undersökning av fiberinblandning i normal betong [14]-[17] indikerar att sprickbildningsbenägenheten minskar då olika typer av fiber används.

3.7 Slutsatser

Önskedrömmen när det gäller minimeringen av risken för sprickbildning vid plastisk krympning uttrycks tydligt i [18]:

> "It would be advantageous if, from a knowledge of the factors causing or resisting plastic shrinkage cracking, it were possible to advise on the design of a concrete mix that would ensure its optimum resistance to this type of cracking, because such concretes would, of course, reduce the incidence of cracking in areas where cracking takes place at irregular intervals."

Uppgiften att utveckla en modell som beskriver risken för sprickbildning verkar vara gigantisk, med tanke på det stora antalet material-, konstruktions- och miljöparametrar. En liten förändring av cementets reaktivitet eller en mindre ökning av mängden tillsatsmedel kan accelerera eller retardera tillstyvnandet, vilket kan ge upphov till stora avvikelser från förväntade värden [34]. Dessutom finns det ingen utrustning för bestämning av brottmekaniska egenskaper. Detta dystra förhållande beror egentligen på att man inte lyckats förklara kopplingen mellan plastisk krympning och utvecklingen av dragspänningar.

I nästa kapitel läggs fram preliminära modeller som beskriver plastisk krympning och sprickbildning som funktioner av material-, konstruktions- och miljöparametrar. Dessa modeller kommer att utgöra grunden för utvecklingen av en beräkningsmodell.

Modellerna för plastisk krympning och sprickbildning verifierades genom att:

A. undersöka plastisk krympning vid olika material-, konstruktions- och miljöparametrar

B. framtvinga olika typer av sprickor med utgångspunkt från modellerna i Fig. 3.2. Parametrar:

   - avdunstningshastighet
   - typen av tvång

C. undersöka olika åtgärder som förhindrar sprickbildningen:

   - ändring av betongparametrar
   - lagringsbetingelser
   - fiber

D. jämföra labundersökningar med fältmätningar genom bestämning av avdunstning och utveckling hos porvattentrycket.

4 MODELLBESKRIVNING

Betongmassans volymändring de första timmarna efter gjutning orsakas av vattenseparation och plastisk krympning. Vattenseparationen, som skyddar betongen mot tidig uttorkning och plastisk krympning, oftast minimeras på grund av följande negativa effekter:

- svag överyta pga högt vattencementtal vid ytan
- vattnet samlas i fickor under armering och större stenar
- stora och ojämna förändringar av betongelementets tjocklek (risken för sättsprickor är stor).

Betongens vattenseparationen minskas av:

- stor specifika yta hos cementet
- användning av flyttillsatser och vattenreducerande medel
- användning av luftporbildande medel
- ökad filler- och slamhalt i ballasten
- användning av tillsatsmaterial (flygaska och silika).

De flesta betongsammansättningar som används idag (dvs modern betong) kännetecknas av låg vattenseparation. Konsekvensen av låg vattenseparation är att betongytan blir torr strax efter gjutning, vilket resulterar i att sättning och plastisk krympning blir samtidiga fenomen. Dessutom påverkar tillsatsmaterialen och flyttillsatserna dels krympningsförloppet och dels utvecklingen av betongens draghållfasthet; hög fillerhalt och flytmedel fördröjer tillstyvnandet och utvecklingen av draghållfasthet.

Hos betong med låg vattenseparation börjar den plastiska krympningen strax efter gjutning, vilket betyder att sprickbildning i mycket tidig ålder är till största delen ett materialproblem.

4.1 Typer av sprickor orsakade av plastisk krympning

Det har observerats att större andel makadam, rätt utfört underbyggnad och användning av fiber minskar betongens sprickbildningsbenägenhet. Är det verkligen sprickbildningen som minskar eller kan det vara så att vid vissa kombinationer av material- och konstruktionsparametrar är sprickorna osynliga?

Vid utvecklingen av en beräkningsmodell som beskriver sprickbildningen orsakad av avvattning genom avdunstning, måste olika typer av sprickor beaktas. Man kan då välja rätt kombination av ballastmaterial, fiber och underbyggnad för att utveckla sprickfria betongsammansättningar. Det är därför ytterst viktigt att man är medveten om att både synliga och osynliga sprickor kan utvecklas i en betongmassa utsatt för tidig uttorkning, se Fig. 4.1.

Synliga sprickor

1. Sprickor i ythinnan (se Fig. 4.1.1) kan uppstå då mycket fint material samlas på betongens överyta. En konsoliderad, torr och styv hinna bildas ganska snabbt. När underliggande betong börjar krympa uppstår tryck- och skjuvspänningar i ythinnan som

oftast leder till sprickbildning av den här typen. Den enda negativa effekten är att betongytan försvagas.

2. Ytsprickor (se Fig. 4.1.2) kan utvecklas hos samtliga betongsammansättningar, men de är typiska för betong med lägre vattencementtal, t ex högpresterande betong. På grund av betongens låga permeabilitet kan vatten inte transporteras till ytan, vilket gör att det bildas ett torrt skal vid ytan. I ett sådant fall är skillnaden mellan sammandragningen vid ytan mycket större än krympningen någon centimeter under ytan. Sprickdjupet begränsas av att betongmassan under skalet har oförändrat vatteninnehåll och konsistens. Dessa sprickor kan däremot fungera som sprickanvisningar vid andra belastningar (kemisk krympning och temperaturskillnader)

3. Genomgående sprickor (se Fig. 4.1.3) kan utvecklas i normal betong, då hela betongmassan krymper pga hög permeabilitet. Denna krympning, tillsammans med skillnader i styvhet och ett antal konstruktionsparametrar, kan resultera i grova genomgående sprickor.

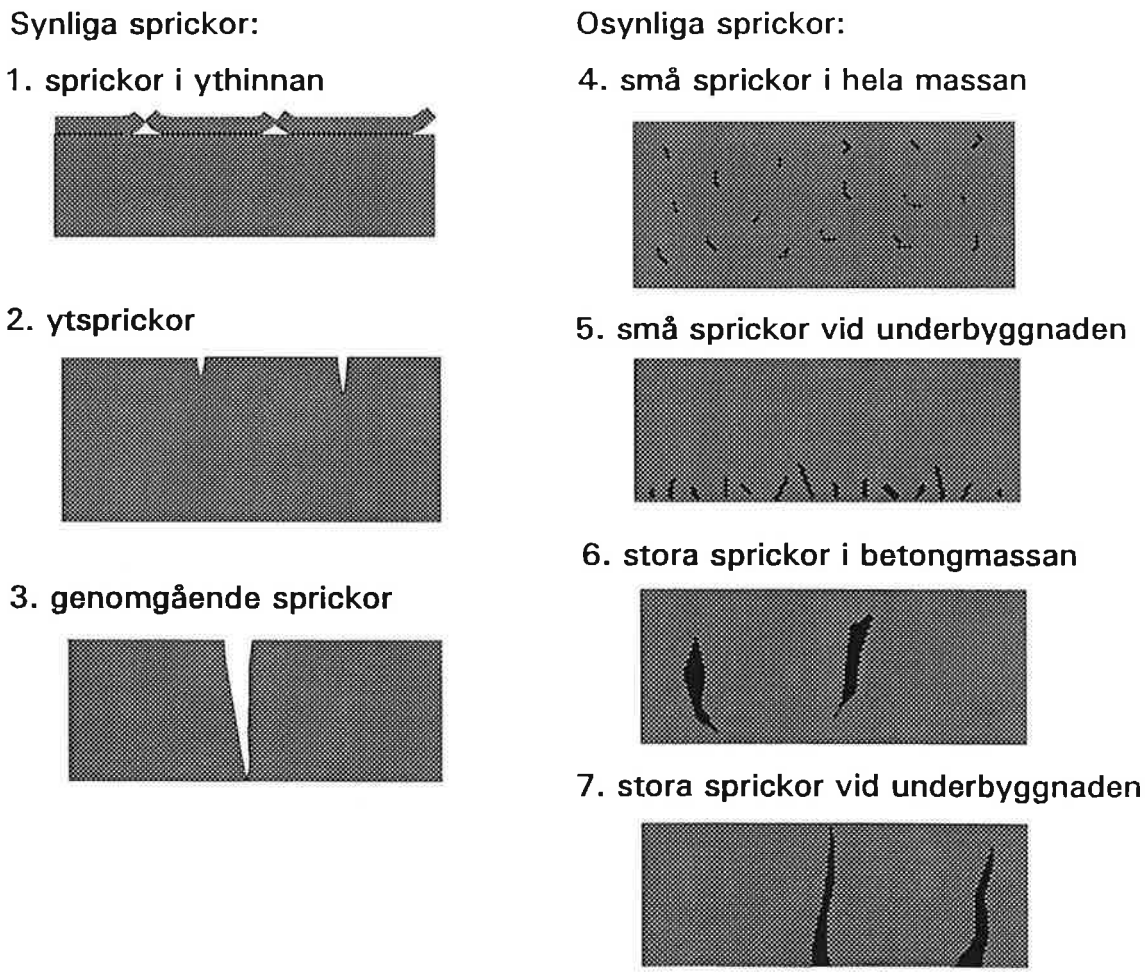


Fig. 4.1 Typer av sprickor

Osynliga sprickor

4. Små sprickor jämnfördelade i hela massan (se Fig. 4.1.4) är möjliga vid vissa ballastgraderingar eller vid användning av fiber. På grund av väggeffekten är porositeten vid ballast- och fiberytorna större än cementpastans, vilket gör att dessa områden töms först på vatten då blandningsvattnet utsätts för större undertyck. Sprickor kan uppstå i dessa svaga punkter. Spricklängden kan begränsas med rätt kombination av ballast och fiber. Dessa sprickor är ofarliga eftersom de fylls med hydratations-produkter under första dygnet efter gjutning.

5. Små sprickor vid underbyggnaden (se Fig. 4.1.5) är möjliga då betongen gjutits på makadambädd. Stor friktion mellan nygjutna betongen och makadambädden, samt stor porositet vid makadamytorna (se punkt 4) kan skapa sådana sprickor.

6. Stora sprickor i betongmassan (se Fig. 4.1.6) kan uppstå, om man bortser från fallen då gjutning och vibrering inte är rätt utförda, vid låga vattencementtal och orsakas av tryck- och temperaturskillnader. Orsaken är snarare den kemiska krympningen än plastisk krympning.

7. Stora sprickor vid underbyggnaden (se Fig. 4.1.7) bör vara typiska hos reparations betong som vanligen gjuts på ett ojämnt underlag.

4.2 Mekanismen vid sprickbildning

Man kan lätt inse att modellen i Fig. 3.5.a inte beskriver kopplingen mellan krympning och utveckling av dragspänningar, som kan i vissa fall överstiga betongens brottöjning, och är därför praktiskt oanvändvar. Det är inte själva krympningen som orsakar sprickbildningen utan samspelet mellan krympskillnader och en rad konstruktions-parametrar.

I Fig. 4.2 visas typiska kurvor som beskriver utvecklingen hos krympning och vattentryck då betongytan utsätts för tidig uttorkning, samt en ny modell som beskriver sprickbildningen orsakad av plastisk krympning.

Man kan skilja fyra stadier hos utvecklingen av krympning:

I. Ett initieringsstadium av ökande krympningshastighet. Vattenfilmen på betongens överyta har förlorat sin planhet. Vattenmenisker med stor krökningsradie, vilket motsvaras av lågt vattenundertryck, börjar bildas.

II. Hög och nästan konstant deformationshastighet. Vattenmeniskerna håller sig fortfarande nära ytan men krökningsradien minskar. Detta stadium kännetecknas också av ökande tryckfallshastighet.

III. Deformationshastigheten minskar på grund av att betongen börjar tillstyvna, vilket kan förklaras av att en del fasta partiklar får kontakt med varandra. Fortsatt avdunstning gör att vattenmeniskerna sjunker under betongytan. Vattentrycket ökar med nästan konstant hastighet. Under detta stadium brukar kapillärsystemet bli diskontinuerligt och möjligheten att bestämma vattentryck upphör.

IV. Mycket låg och konstant deformationshastighet. Materialet beter sig "elastiskt" (deformationen är proportionell mot vattentrycktet), vilket beror på att partikelkontakt uppnåtts mellan de flesta korn. Vattentrycket kan fortsätta att öka i vissa fall.

Då betongmassan utsätts för tidig uttorkning uppstår undertryck i blandningsvattnet. Betongen avvattnas, genom att kapillära krafter transporterar en del av blandningsvattnet til ytan, och det fasta materialet konsolideras. Hastigheten hos konsolideringen beror på avdunstningshastigheten, betongens permeabilitet och de fasta partiklarnas rörlighet i förhållande till varandra (ballastkornen är mindre rörliga än cementkornen). Avvatningen är störst i områdena med stor porositet: formkanter och ballastytor pga väggeffekten, samt olika defekter pga undermålig gjutning och vibrering. Konsolideringen innebär omlagring av det fasta materialet, vilket betyder att, för inte allt för styva konsistenser, är relaxationen mycket hög. Betongen beter sig som en tjock vätska och dragspänningar kan inte uppstå.

På grund av avvattning och kemiska reaktioner förlorar så småningom betongen sin plasticitet (förmågan att konsolideras genom omlagring) och tillstyvnar. Början på tillstyvnandet sammanfaller med slutet av stadium II och markerar att betongens relaxation börjar avta. Tillstyvnandet påverkas framför allt av vattencementtal, graden av avvattning och temperatur.

Dragspänningar och sprickor kan utvecklas under stadium III och IV, då krympningen motsvaras inte längre av en omlagring hos det parikelformiga materialet.

Miljö- och materialparametrarna bestämmer i första hand krympningshastigheten och krympningens storlek vid slutet av period II och i andra hand utvecklingen av betongens draghållfasthet. För att förklara utvecklingen av dragspänningar måste tas hänsyn till ett antal konstruktionsparametrar:

1. utformning:
   - plattans bredd, längd och tjocklek
   - förstyvningar (balkar, voter, mm)
2. randvilkor:
   - formkanter
   - underbyggnad
3. armering

och till de samverkande belastningar: ojämn deformation pga krympning och betongens egenvikt.

För en homogen betong kan den beräknade utvecklingen av dragspänningar (sträckade kurvan i Fig 4.1) bestämmas med hjälp av finita element metoden om miljö-, material- och konstruktionsparametrar, samt spännings-deformationssambandet är kända.

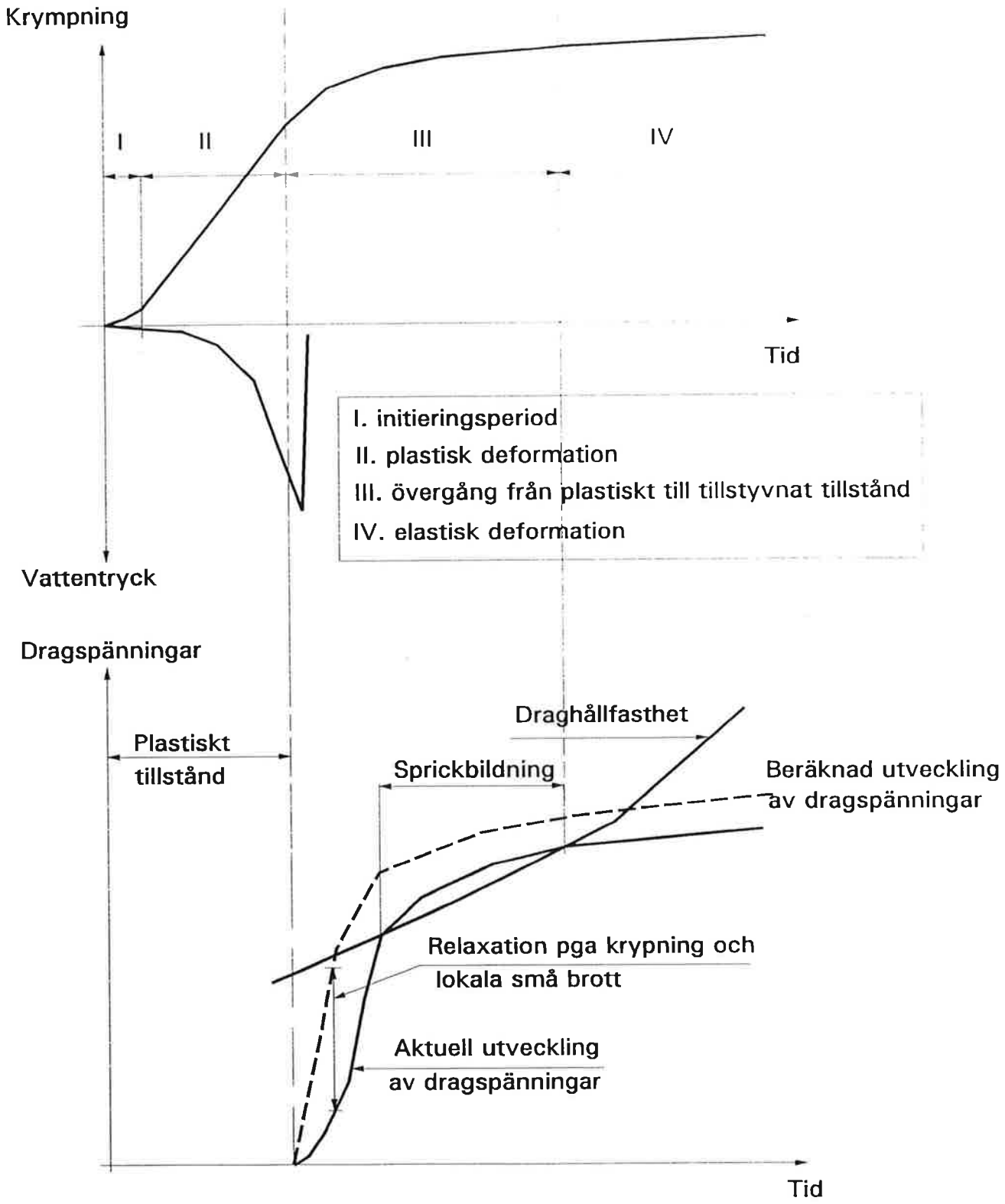


Fig. 4.2 Krympning, vattentryck och modell för sprickbildning

Modellens första nyhet består i att både krympning och konstruktionsparametrar betraktas som bestämmande faktorer vid utvecklingen av dragspänningar. Hos t ex en relativt liten provkropp kommer aldrig dragspänningarna att överstiga draghållfastheten och därmed kan man inte vänta sig att få se några riktiga krympsprickor.

Den andra nyheten är att modellen inför skillnaden mellan beräknad och aktuell utveckling av dragspänningar. Då dragspänningar uppstår i betongen kommer spänningsnivån att minskas av betongens relaxation som beror på:

- betongens krypning
- små brott vid ballast- och fiberytorna
- små sprickor vid underbyggnaden.

Det är den aktuella utvecklingen av dragspänningar (se Fig. 4.2) och betongens draghållfasthet som bestämmer sprickbildningen. Man kan med hjälp av modellen i Fig. 4.2 resonera sig fram till vad man kan göra för att minimera risken för sprickbildning. Dessa möjligheter åskådliggörs med hjälp av diagrammen i Fig. 4.3.

I Fig. 4.3.A visas den självklara åtgärden, nämligen att skydda betongen mot kraftig uttorkning i tidig ålder. Vid låg avvattning genom uttorkning bestäms tillstyvnandet av hydratationen. Lågt slutvärde hos den plastiska krympningen gör att dragspänningarna aldrig överstiger betongens draghållfasthet.

Eftersom den aktuella utvecklingen av dragspänningar är beroende av plattans bredd, längd och tjocklek, kan sprickbildning undvikas genom att bestämma gjutfackets kritiska mått för olika betongsammansättningar. På detta sätt kan dragspänningarna hållas lägre än draghållfastheten (se Fig. 4.3.B).

Möjligheten att utveckla betongsammansättningar som är fria från plastiska krympsprickor visas i Fig. 4.3.C. Genom att ta fram lämpliga kombinationer av ballastmaterial (graderingen hos sand och sten spelar en avgörande roll) och fiber kan relaxationen orsakad av små brott ("mikrosprickor") hålla nere de aktuella dragspänningarna trots att den plastiska krympningen är hög. Avsikten är med andra ord att fördela en eventuell kraftig spricka i många jämnfördelade "mickrosprickor". Dessa små sprickor har ingen stor betydelse, då de utvecklas i tidig ålder, eftersom de fylls så småningom med hydratationsprodukter.

Det är uppenbart att en fjärde möjlighet att minska risken för plastiska krympsprickor är att höja betongens draghållfasthet i mycket tidig ålder. Kunskaper om betongens brottmekaniska egenskaper är nödvändiga inte bara från den här synvinkeln, utan också för att kunna utveckla en beräkningsmodell.

För att kunna bestämma risken för sprickbildning måste följande företeelser studeras:

1. Utveckling av krympning och krympskillnader som funktion av miljö- och materialparametrar, samt provkroppens dimensioner.
2. Betongens mekaniska egenskaper som funktion av materialparametrar och graden av avvattning. Det är draghållfastheten och relaxationen under stadium III och IV som är mest intressanta
3. Beräknad utveckling av dragspänningar hos ett antal betydelsefulla fall.

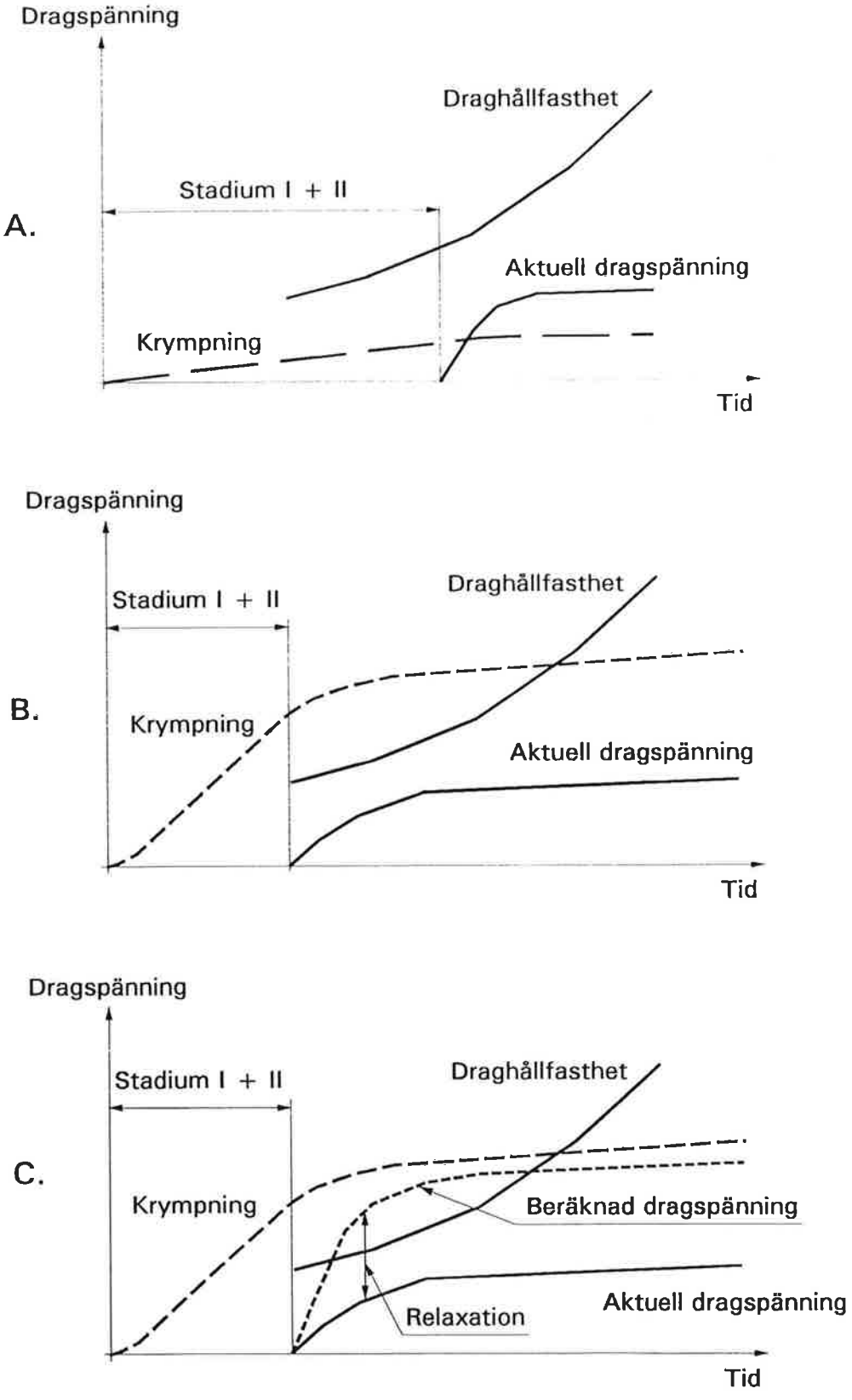


Fig. 4.3 Möjligheter att undvika sprickbildning:
A. skydd mot kraftig uttorkning
B. mindre gjutfack
C. lämplig kombination av ballastmaterial och fiber

4.3 Tillstånd som kan ge upphov till sprickbildning

Den beräknade utvecklingen av dragspänningar kan bestämmas för olika fall med hjälp av ett beräkningsprogram baserat på finita element metoden. Fem fall, som jag anser vara viktiga för sprickbildningen i tidig ålder (se Fig. 4.4), skall granskas i detta avsnitt.

Fall 1: Undermålig gjutning och/eller vibrering

Då en tillstyvnad betongmassa utsätts för större undertyck kommer områdena med stor porositet, som skapats pga undermålig gjutning och/eller vibrering, att tömmas på vatten. Avstånden mellan cementkornen är stora i dessa områden och vattenmeniskerna kan inte hitta stabila lägen där. "Torra" och "våta" (vattenmättade) områden uppstår i betongmassan. Fortsatt uttorkning gör att de "våta" områdena fortsätter att krympa och ger upphov till dragspänningar i de "torra" områdena. Det är tveksamt att spänningstillståndet kan korrekt beskrivas hos sådana fall.

Fall 2 och 3: Skillnader i horisontell krympning

Vid beräkning av spänningstillståndet måste tas hänsyn till följande aspekter:

1. spänningstillståndet beror på plattans dimensioner
2. betongens permeabilitet har avgörande betydelse för utvecklingen av krympning på olika djup (ojämn krympning)
3. på grund av större sammandragning vid ytan kan betongplattor av styvare konsistens ha en tendens att böja sig, vilket innebär att man måste ta hänsyn till plattans egenvikt vid beräkning av dragspänningar
4. eventuella tendenser till att plattan kröker sig styrs också av plattans styvhet, som kan variera kraftig med avståndet från ytan eller pga armering, och av underbyggnaden.

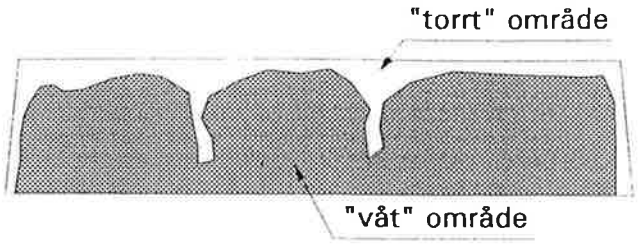
Fall 4 och 5: Skillnader i vertikal krympning

Den vertikala deformationen hos normal betong bör vara större än den horisontella pga samverkan mellan gravitation (vattenseparation) och kapillära krafter (plastisk krympning). Denna deformation är proportionell mot plattans tjocklek hos inte alltför tjocka plattor, vilket kan ge upphov till skillnader i vertikal deformation.

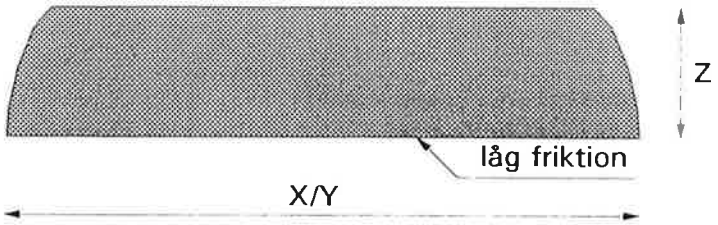
Beräkningsprogramet måste i samtliga fall ta hänsyn till att:

1. Hooks lag (deformationerna är proportionella mot belastningen) inte gäller
2. betongens krympmodul, som beskriver sambandet mellan krympning och undertyck i blandningsvattnet, är tidsberoende (den påverkas av avvatning och hydratation)
3. krympmodulen kan variera kraftigt med avståndet från ytan; hos t ex högpresterande betong

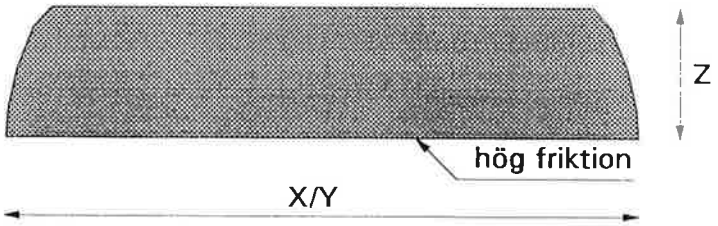
Fall 1.



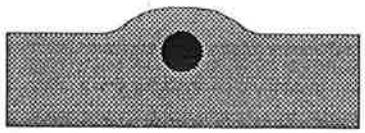
Fall 2.



Fall 3.



Fall 4.



Fall 5.

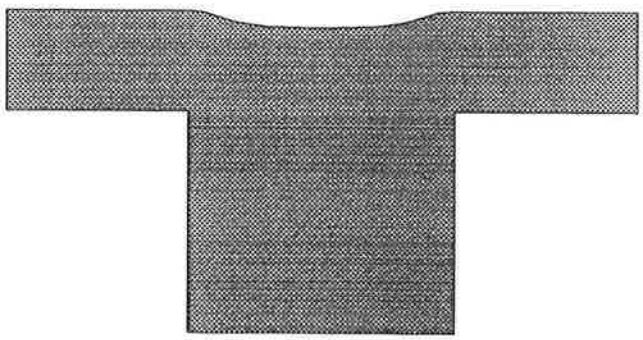


Fig. 4.4 Tillstånd som kan ge upphov till sprickbildning.

Fall 4 och 5 kan kombineras med Fall 2 och 3 för att beskriva verkliga plattor och bjälklag. Det är möjligt att betongelementen i Fig 4.5.a inte spricker trots en viss skillnad i vertikal deformation; dragspännigarna är i dessa fall lägre än draghållfastheten. Samma betong kan däremot spricka i betongelementen som visas i Fig. 4.5.b; samverkan mellan vertikal och horisontell deformation leder till högre dragspänningar.

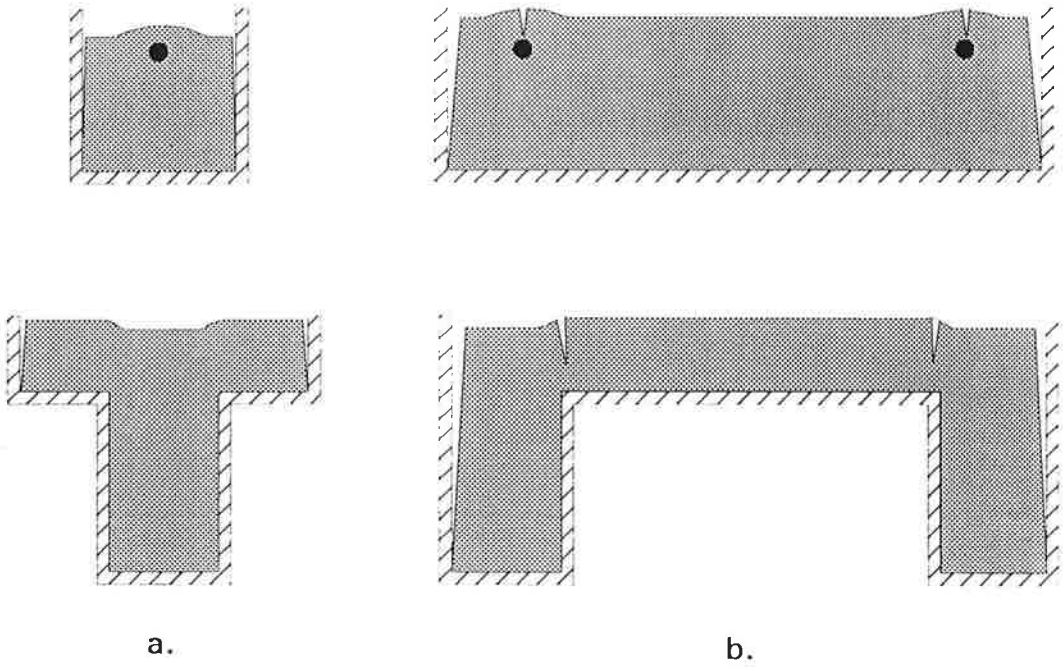


Fig 4.5 Kombinationen av vertikal och horisontell deformation ökar risken för sprickbildning.

För att kunna förutsäga vilken typ av sprickor kan uppstå och framför allt för att bestämma utvecklingen av dragspänningar måste vertikal och horisontell krympning, samt krympskillnader studeras hos olika betongsammansättningar utsatta för olika klimatförhållanden.

Sambanden mellan material-, miljö- och konstruktionsparametrar å ena sidan och vertikal och horisontell krympning å andra sidan diskuteras i nästa avsnitt. Den experimentella delen av detta arbete är huvudsakligen inriktad på att beskriva dessa samband.

4.4 Plastisk krympning

Den plastiska krympningen kan betraktas vara ekvivalent med två simultana vattentransporter: en från betongytan till omgivningen (avdunstning) och den andre från provets inre till ytan (avvattning). Drivkraften hos avvattningen är kapillära krafter som uppstår då vattenmenisker bildas på betongytan.

För att en mängd vatten skall förflyttas från ett visst djup mot ytan måste undertrycket i porvattnet vara större än summan av de krafter som motsätter sig konsolideringen. Man kan få en rätt uppfattning om utvecklingen av vertikal och horisontell krympning på olika platser i en betongplatta om dessa krafter identifieras.

De tryck som motsätter sig avvattningen i horisontell riktning, dvs en minskning av det horisontella avståndet mellan två cementkorn, visas i Fig. 4.6.a.

1. $\mathbf{P_v}$ är trycket som beror på vattenpelaren. Hos en 10 cm betongplatta är detta tryck lika med 1 kPa vid botten.
2. $\mathbf{P_e}$ är trycket som krävs för att övervina elektrostatiska krafter som håller isär cementkornen. Detta tryck beror på den färska betongens egenskaper; dvs vattencementtal, flyttilsatser, mm. Trycket $\mathbf{P_e}$ är tidsberoende eftersom den ökar med minskad avstånd mellan cementkornen.
3. $\mathbf{P_f}$ motsvarar friktionen mellan fasta partiklar. Det beror på betongens reologiska egenskaper och är proportionellt mot avståndet från ytan pga betongens egenvikt. $\mathbf{P_f}$ är också tidsberoende.
4. $\mathbf{P_h}$ är trycket som krävs för att deformera bryggorna mellan cementkornen som uppstår pga hydratation. $\mathbf{P_h}$ är noll under viloperioden och beror på cementtyp, tillsatsmedel, tillsatsmaterial, mm; dvs alla parametrar som påverkar tillstyvnandet.

I vertikal riktning (se Fig. 4.6.b) är $\mathbf{P_f}$ lika med noll eftersom friktionen beror på betongens egenvikt som verkar i vertikal riktning. Dessutom måste det totala trycket minskas med trycket $\mathbf{P_g}$ som beror på densitetsskillnaden mellan fastmaterial och vatten.

Krympningsförloppet beror på samverkan mellan avdunstningen från ytan, de motverkande trycken och betongens permeabilitet.

De motverkande tryckens variation med avståndet från ytan och skillnaden mellan vertikal och horisontell riktning resulterar i två viktiga företeelser:

1. krympningen är störst vid ytan

2. den vertikala krympningen är alltid större än den horisontella krympningen

Skillnaderna mellan krympningen på olika djup blir ännu större hos en lågpermeabel betong pga tryckskillnader. Risken för utveckling av ytsprickor ökar i sådana fall.

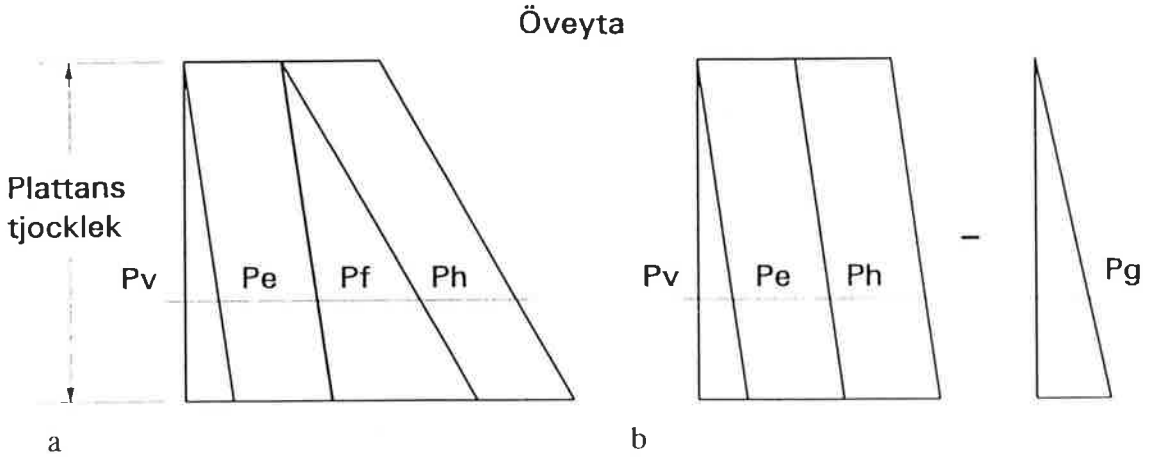


Fig 4.6 Tryck som motsätter sig mot avvattningen mot ytan:
a. horisontell riktning
b. vertikal riktning

Under stadium I och II (se Fig 4.2), då vattenmeniskerna håller sig vid betongytan, kan den totala kympningen betraktas som likvärdig med volymen avdunstat vatten. Detta innebär att hos samma betongsammansättning är lutningen hos deformationskurvan proportionell mot avdunstningshastigheten **dW/dt** (se Fig 4.7). Följande ekvation kan då skrivas:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = k_1 \frac{dW}{dt} \qquad (1)$$

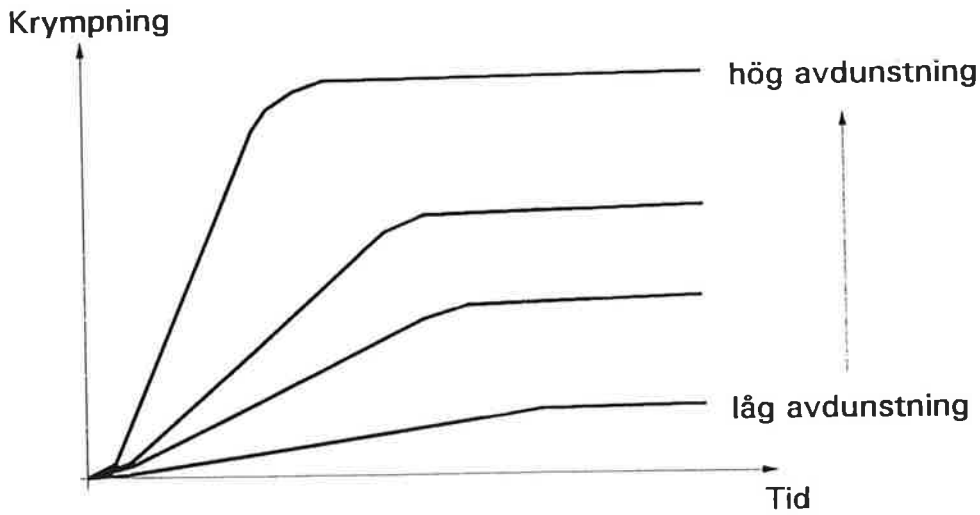


Fig. 4.7 Krympning vid olika avdunstningshastigheter.

I Fig. 4.8 visas tre modeller som beskriver den horisontella krympningen på olika avstånd från ytan.

Modellen A kan tänkas gälla för en betong med hög permeabilitet och ganska styv konsistens. Vattenavgången mot ytan sker relativt fritt men utan en nämnvärd omplasering av det fasta materialet. Att krympningen på ett visst avstånd från ytan är mindre än krympningen vid ytan förklaras av att friktionen mellan olika skikt ökar med ökad avstånd från ytan.

Modellen B gäller för en normal betong av lösare konsistens. Man kan säga att en sådan betong visar under en första period, innan stora förändringar av konsistensen äger rum, en tendens av att fylla ut formen. Detta innebär en omlagring av det fasta materialet, vilket kan leda till att en stor del av den totala krympningen uppvisas som vertikal krympning (ett extremt fall är ett kärl vattenfyllt med som utsätts för avdunstning).

Då betongen har en låg permeabilitet (lågt vattencementtal) kommer, på grund av att avvattningen är mycket större vid ytan, skikten vid ytan att tillstyvna tidigare en betongens mittparti, se modell C.

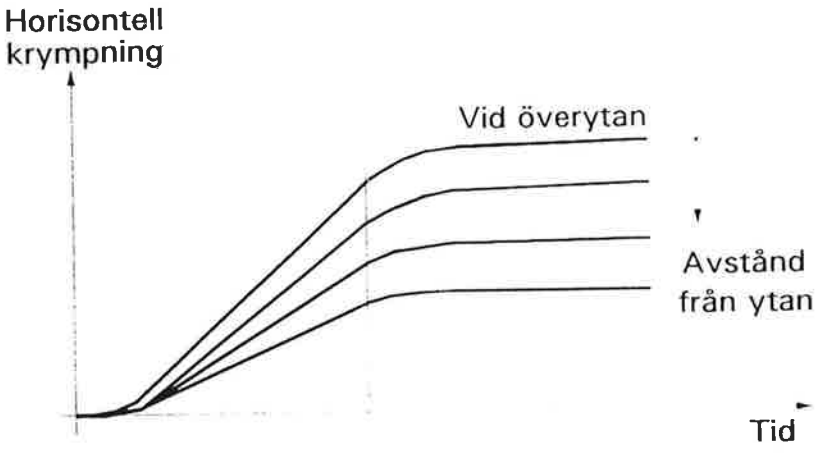
Eftersom både krympning och mängd avdunstat vatten är funktioner av tid, kan den horisontella förskjutningen vid ytan x_0 uttryckas som funktion av mängden avdunstat vatten **W**. Om vi antar att modellen C i Fig. 4.8 gäller, så kan förskjutningen x_z på djupet **z** uppskattas med hjälp av följande ekvation (se också Fig 4.9):

$$x_z = k_1 k_2 (W - k_3 z) \qquad (2)$$

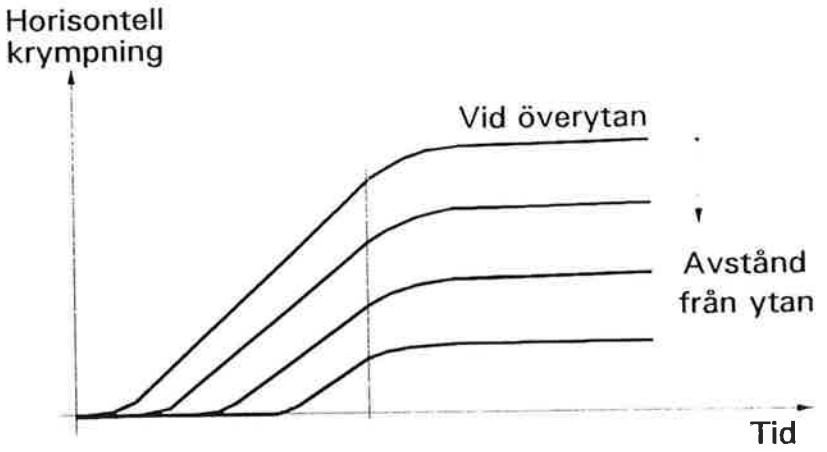
där:

$k_1 = x_0/W$ (se ekvation (1))
k_2 uttrycker skillnaden i krympningshastighet och kan vara beroende av betongens konsistens (vid styva konsistenser är $k_2 = 0$)
k_3 bör framförallt bero på betongens permeabilitet.

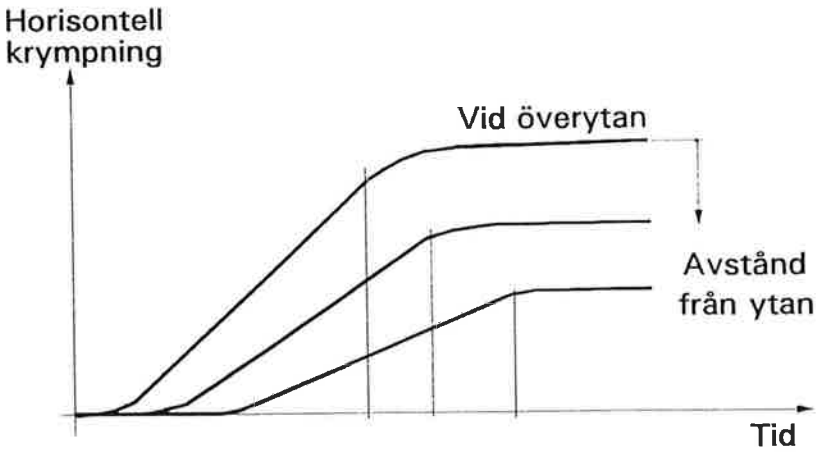
För att kunna bestämma den plastiska förskjutningen i horisontell riktning måste mängden avdunstat vatten **W** och konstanterna k_1, k_2, k_3 bestämmas med hjälp av laboratorie försök.



A



B



C

Fig. 4.8 Modeller för horisontell krympning på olika avstånd från ytan.

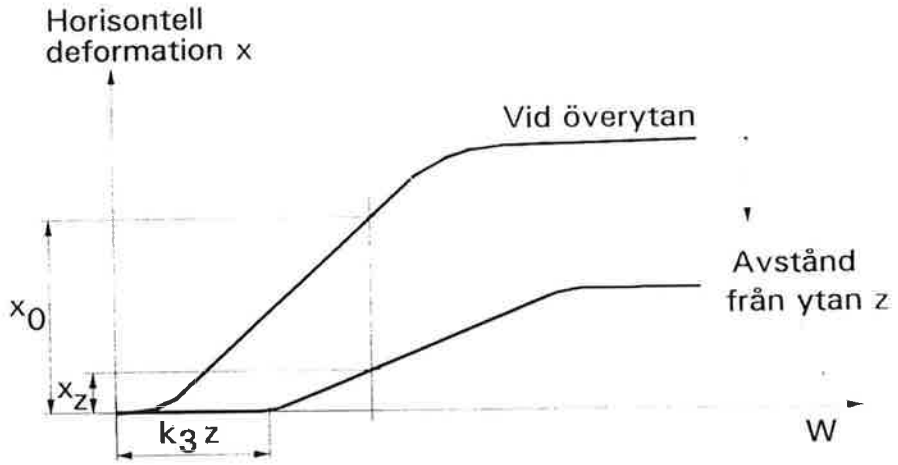


Fig. 4.9 Horisontell krympning på olika avstånd från överytan.

Det finns tre aspekter som måste betraktas i samband med vertikal krympning:

1. den vertikala krympningen vid ytan är proportionell mot den horisontell krympningen vid ytan (**z=0**)

$$y_0 = k_4 x_0 \qquad (3)$$

2. den vertikala krympningen vid ytan är proportionell mot plattans tjocklek **L**

$$y_0 = k_5 L \qquad (4)$$

3. den vertikala krympningen är också beroende av avståndet från betongens överyta

$$y_z = k_6 z y_0 \qquad (5)$$

Med hjälp av ekvationerna (1)-(5) kan man uppskatta förskjutningen i olika punkter av en betongplatta. Konstanterna k_1-k_6 måste bestämmas för olika betongsammansättningar med hjälp av laboratorieförsök.

4.5 Slutsatser

Laboratorie undersökningarna som utfördes för detta arbete är inriktade på att:

1. undersöka eventuella samband mellan oförhindrad plastisk krympning och miljö- och materialparametrar, dvs att bestämma konstanterna k_1-k_6:

   - betongparametrar:
   - cementtyp och malfinhet
   - vattencementtal
   - volymandel pasta (cementhalt)
   - flytmedel
   - tillsatsmaterial (silika och fiber)

   - miljöparametrar:
   - luttemperatur
   - luftfuktighet
   - vindhastighet

   - efterbehandling
   - fri avdunstning med måtliga och låga avdunstningshastigheter
   - vattenlagring
   - membranhärdning (plastfolie och membranhärdare)

   - provkroppsstorlek
   - provkroppens tjocklek
   - provkroppens längd

2. undersöka normal betongs sprickbildningsbenägenhet för samma parametrar som ovan genom att använda olika typer av betongformar som förhindrar till en viss del krympningen

3. studera sprickbildningen hos tunna skikt (5, 10 och 15 mm) av cementpasta och bruk för att få klarhet i vad som händer vid en betongyta

5 Program och försöksbetingelser

5.1 Program

Laboratorieförsöken omfattar undersökningar av oförhindrad plastisk krympning och sprickbildning hos normal betong med följande vattencementtal:

0,77 K25 trög-, lätt- och högflytande

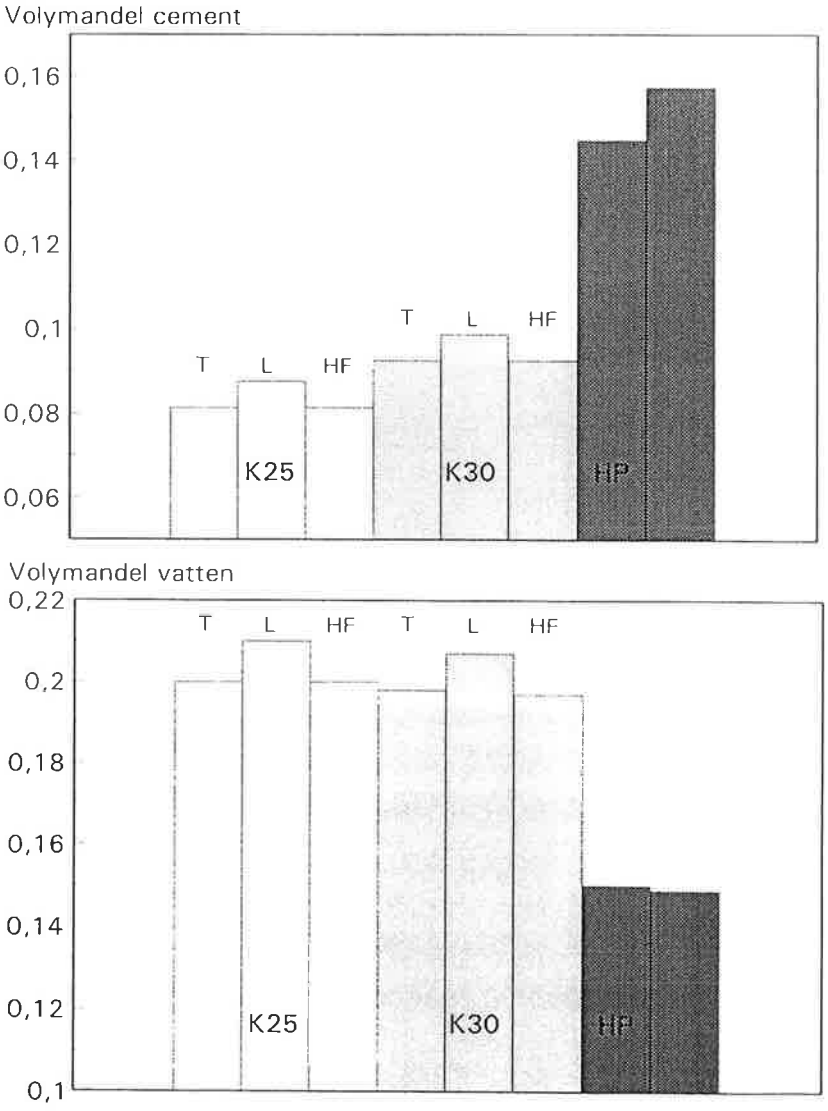
0,67 K30 trög-, lätt- och högflytande

0,57 med olika andelar cementpasta

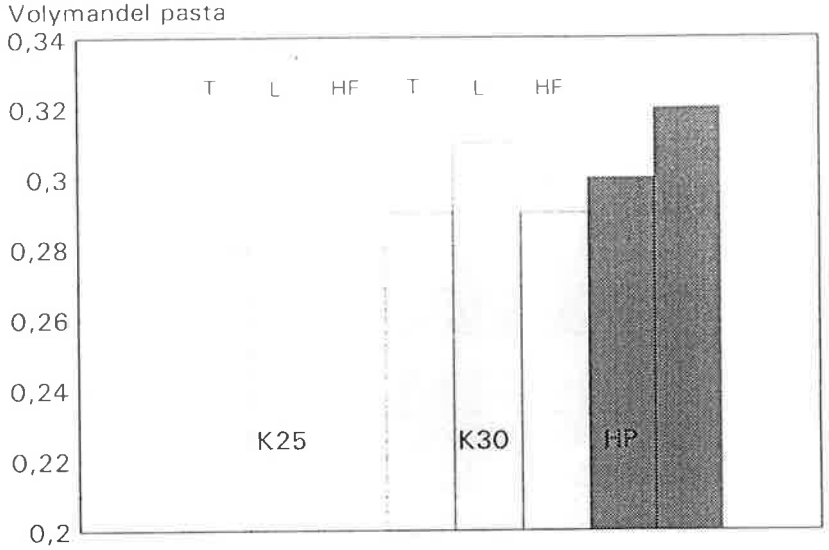
5.2 Delmaterial

5.3 Sammansättning och tillverkning

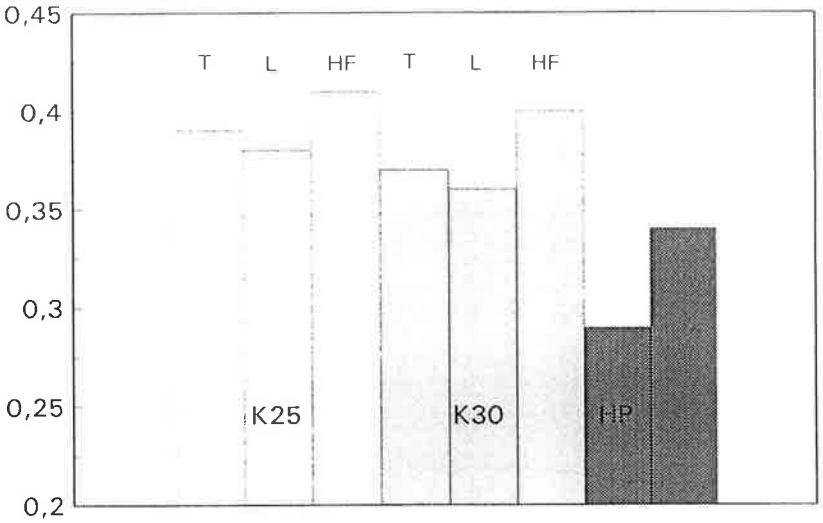
I nedanstående diagram visas de viktigaste skillnaderna i sammansättning hos de använda betongtyperna, som också jämförs med en vanlig sammansättning hos högpresterande betong.



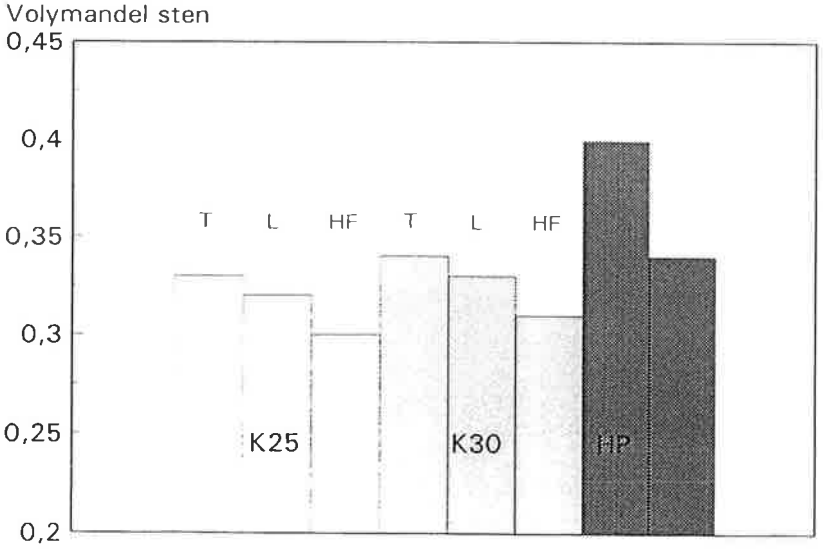
Volymandel pasta



Volymandel sand

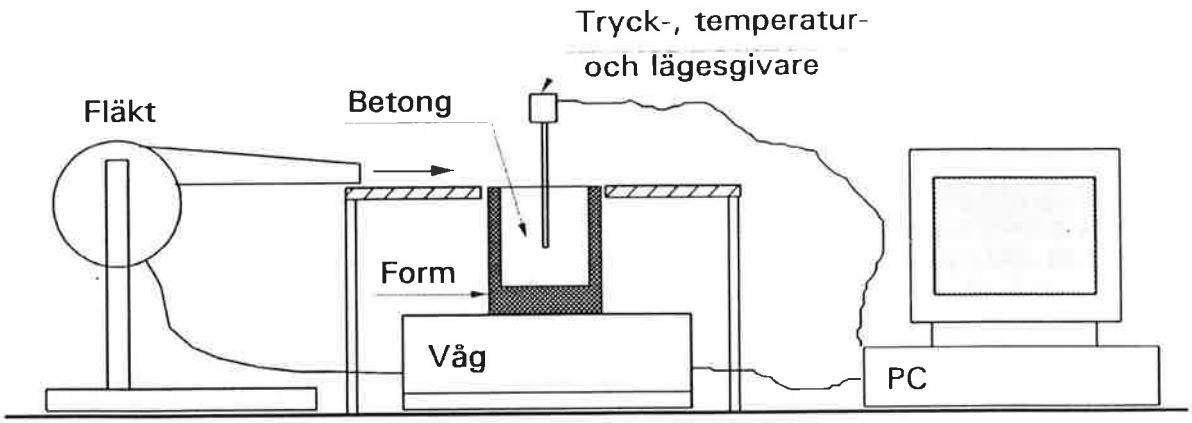


Volymandel sten

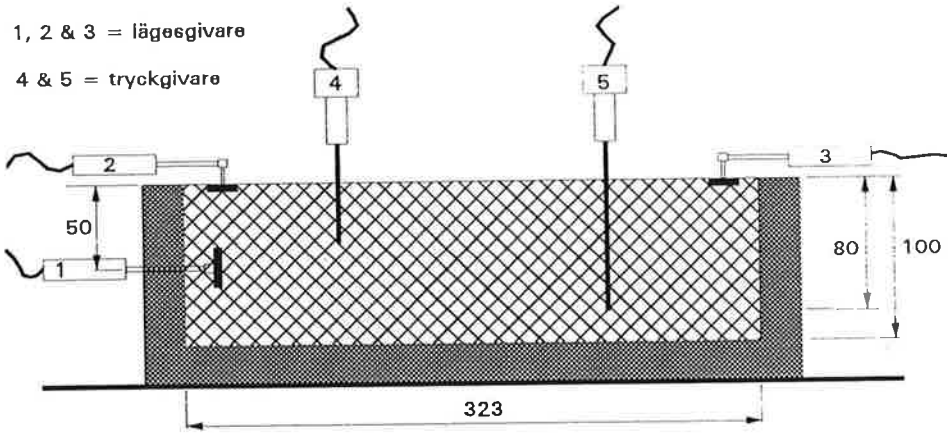


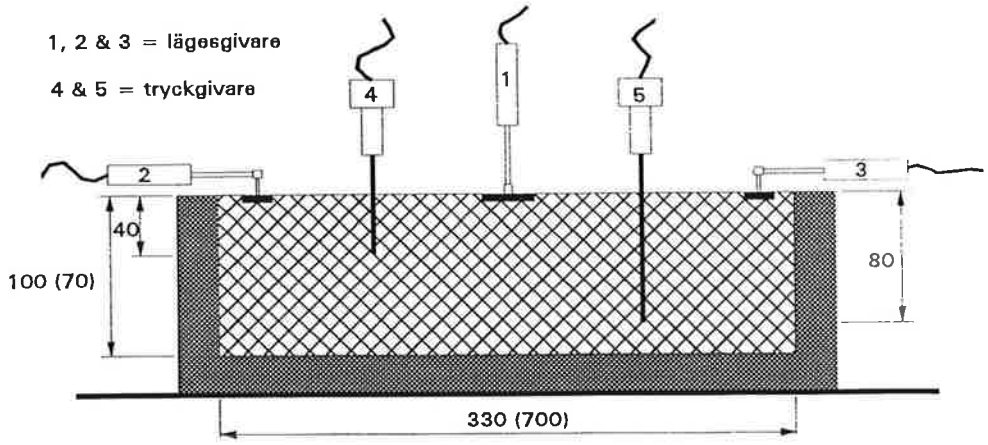
5.4 Provningsmetoder

Försöksuppställningen och betongformarna visas i nedanstående figurer

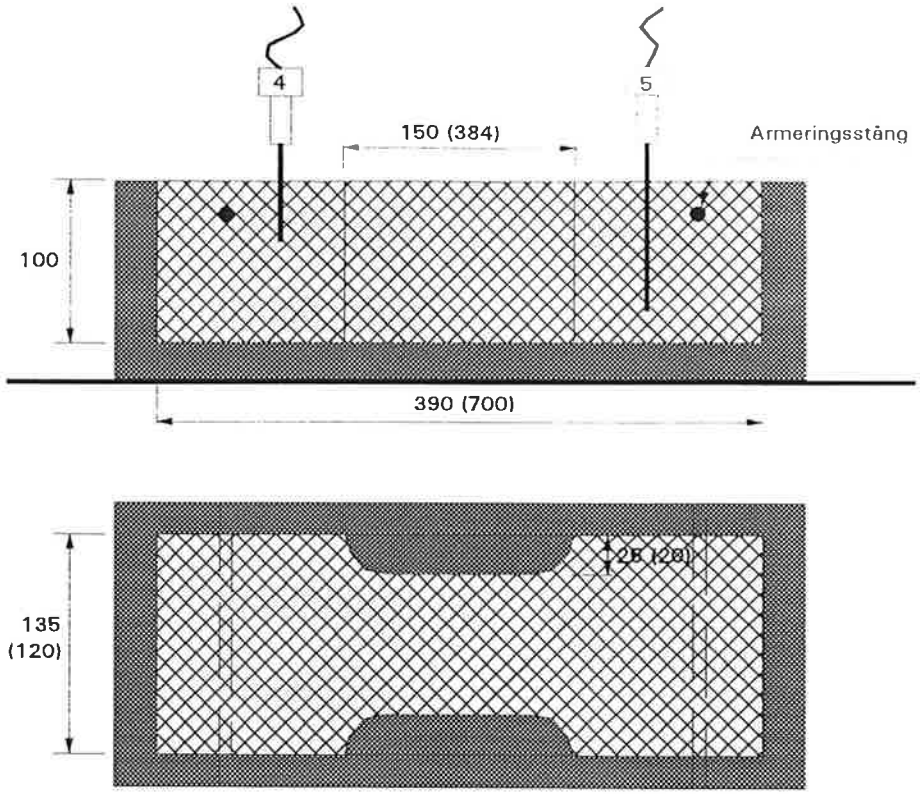


Försöksuppställning



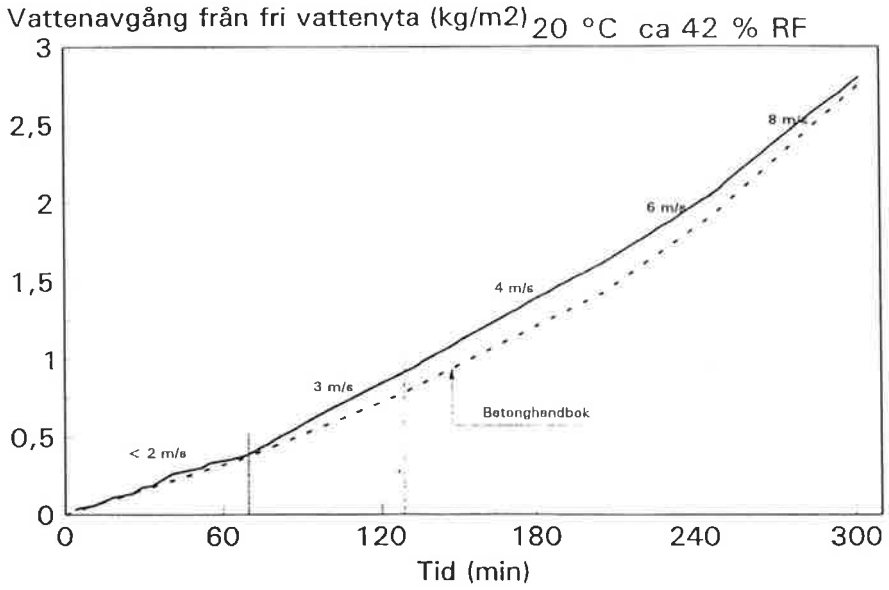


Betongformar vid oförhindrad krympning



Betongformar vid förhindrad krympning (sprickbildning)

Avdunstningshastigheten varierades med hjälp av en fläkt. I figuren nedan jämförs de erhållen vattenavgång med vattenavgången enligt diagram i Betonghandboken.



Vatteavgång från fri vattenyta

6 Analys av laboratorie undersökningar

I Fig. 6.1-6.6 visas några exempel på försöks resultat vid oförhindrad plastisk krympning:

Fig. 6.1 Krympning vid olika avdunstningshastigheter: krympningshastigheten och krympningens slutvärde är ökar med ökad avdunstningshastighet.

Fig. 6.2 Effekten av membranhärdning: vid membranhärdning utvecklas undertrycket i blandningsvattnet ca 5 tim efter gjutning; jämför med tryckförloppet vid 7 m/svindhastighet.

Fig. 6.3 Inverkan av vattencementtal på vertikal och horisontell krympning vid ytan.

Fig. 6.4 Inverkan av vattencementtal på horisontell krympning vid ytan och på 50 mm djup.

Fig. 6.5 Skillnaden mellan krympning vid låg och vid hög avdunstningshastighet: vid 0 m/s vindhastighet är den vertikala krympningen orsakad av vattenseparation.

Fig. 6.6 Inverkan av plattans tjocklek: den absoluta vertikala krympningen är proportionell mot plattans tjocklek.

I Fig. 6.7-6.10 visas några exempel på sprickbildning.

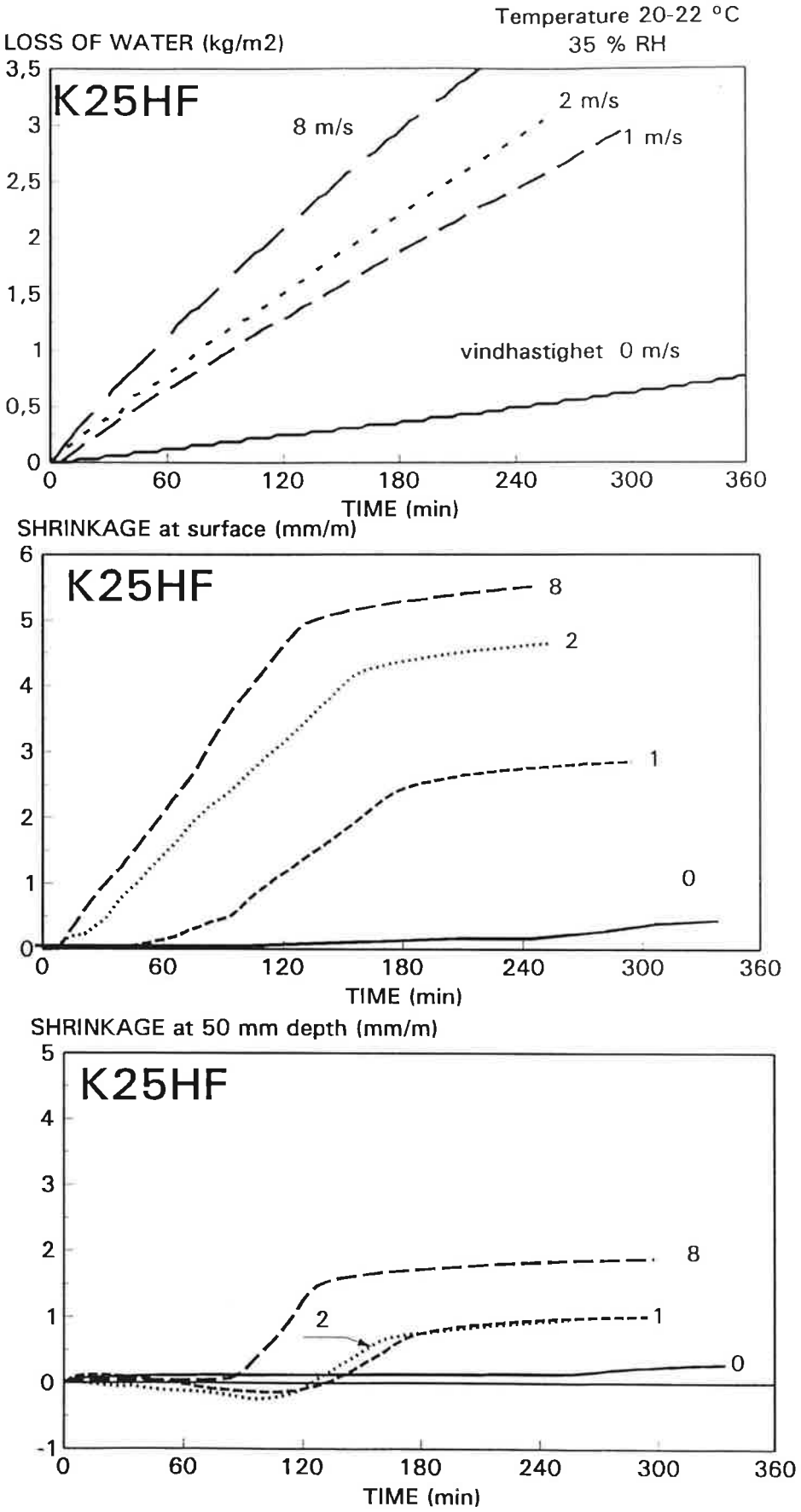


Fig. 6.1 Krympning vid olika avdunstningshastigheter.

K30L

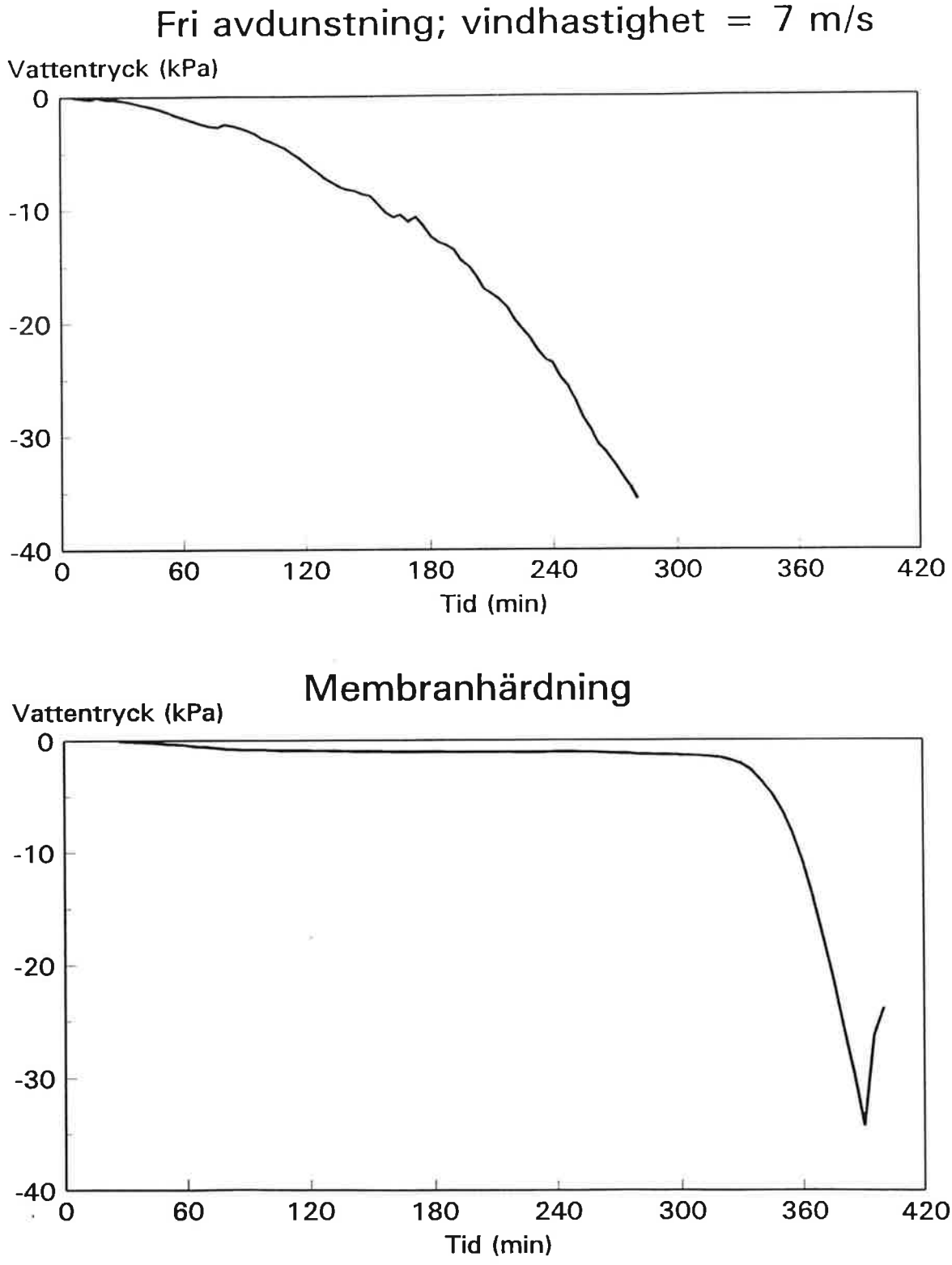


Fig. 6.2 Effekten av membranhärdning.

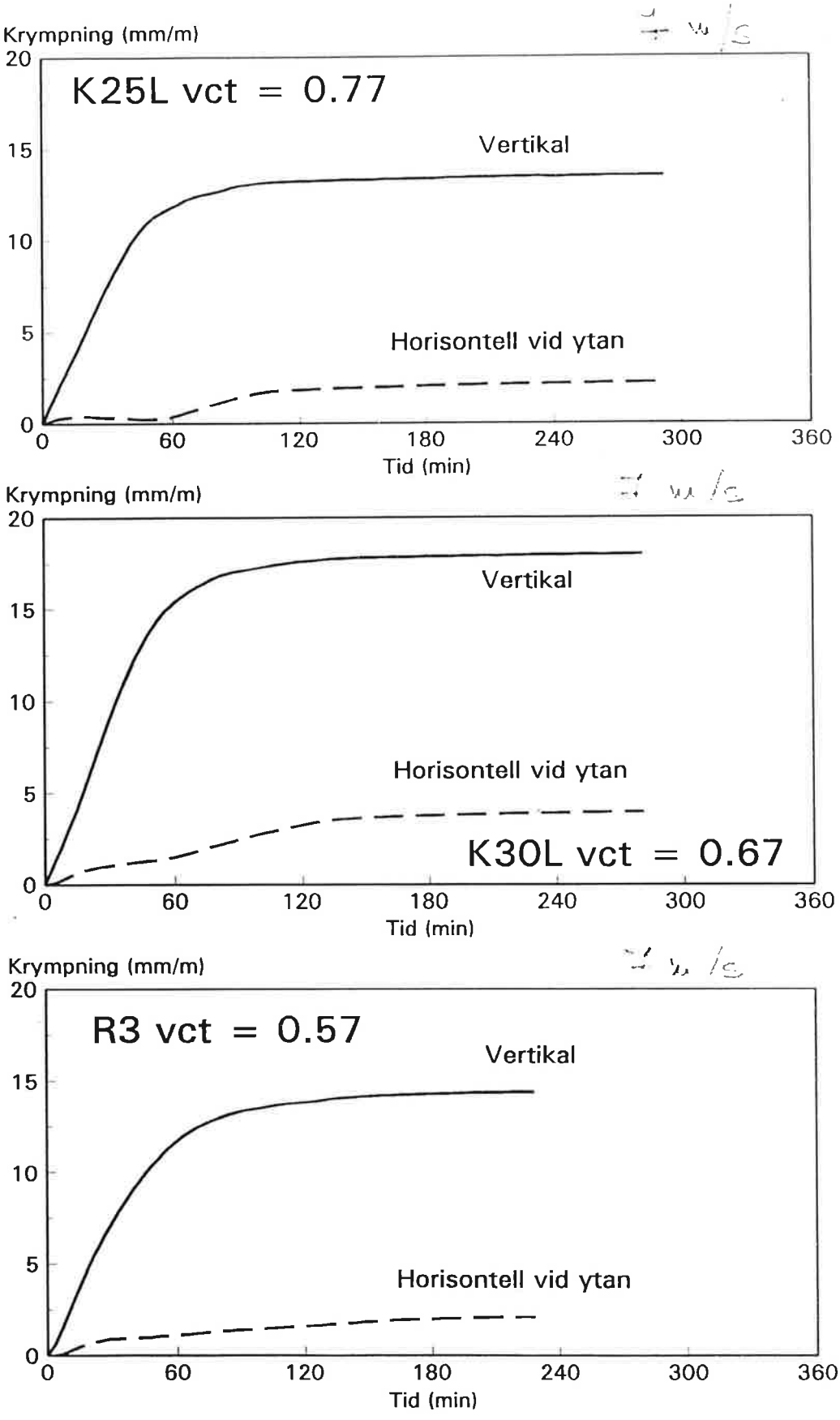


Fig. 6.3 Inverkan av vattencementtal på vertikal och horisontell krympning vid ytan.

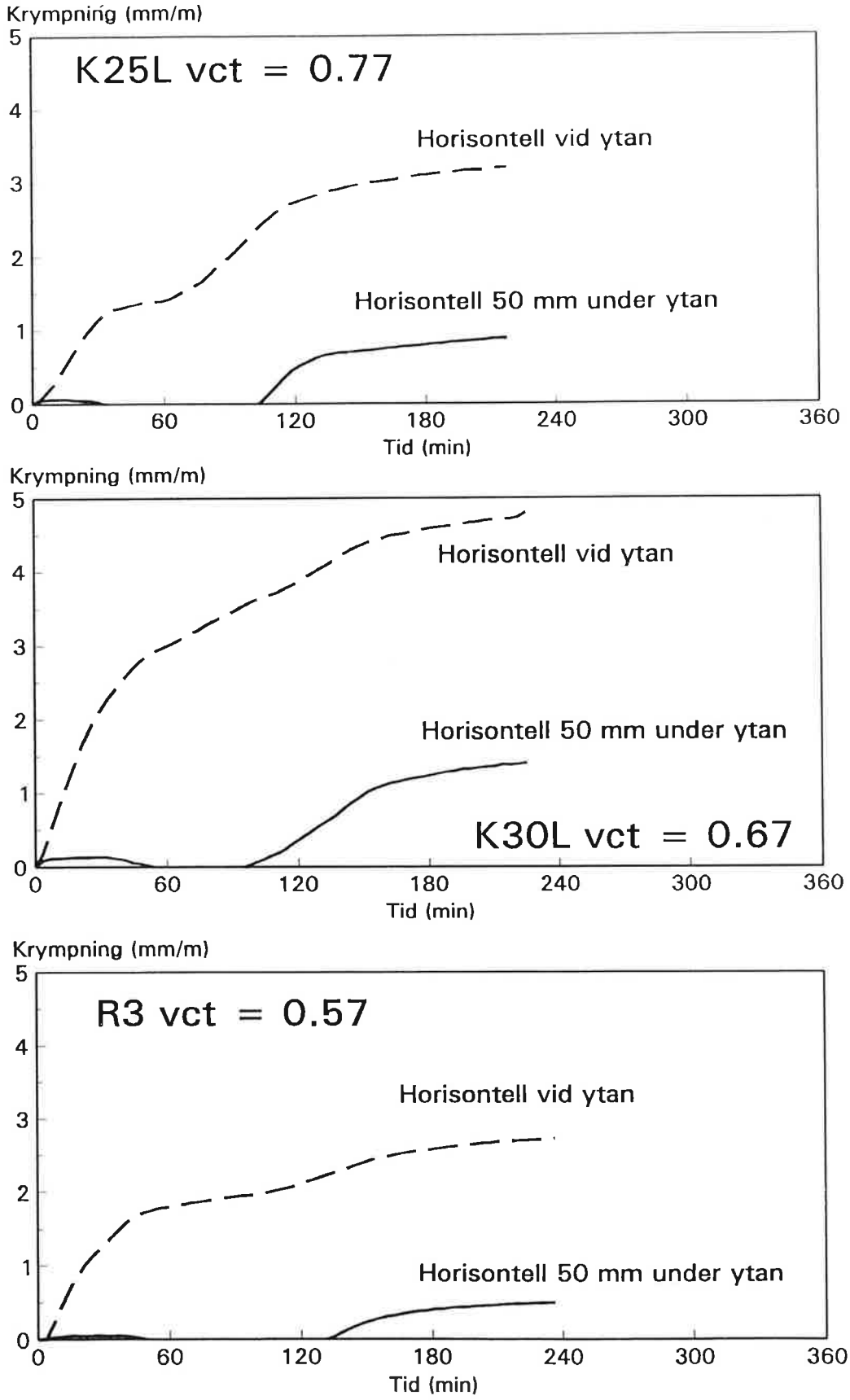


Fig. 6.4 Inverkan av vattencementtal på horisontell krympning vid ytan och på 50 mm djup.

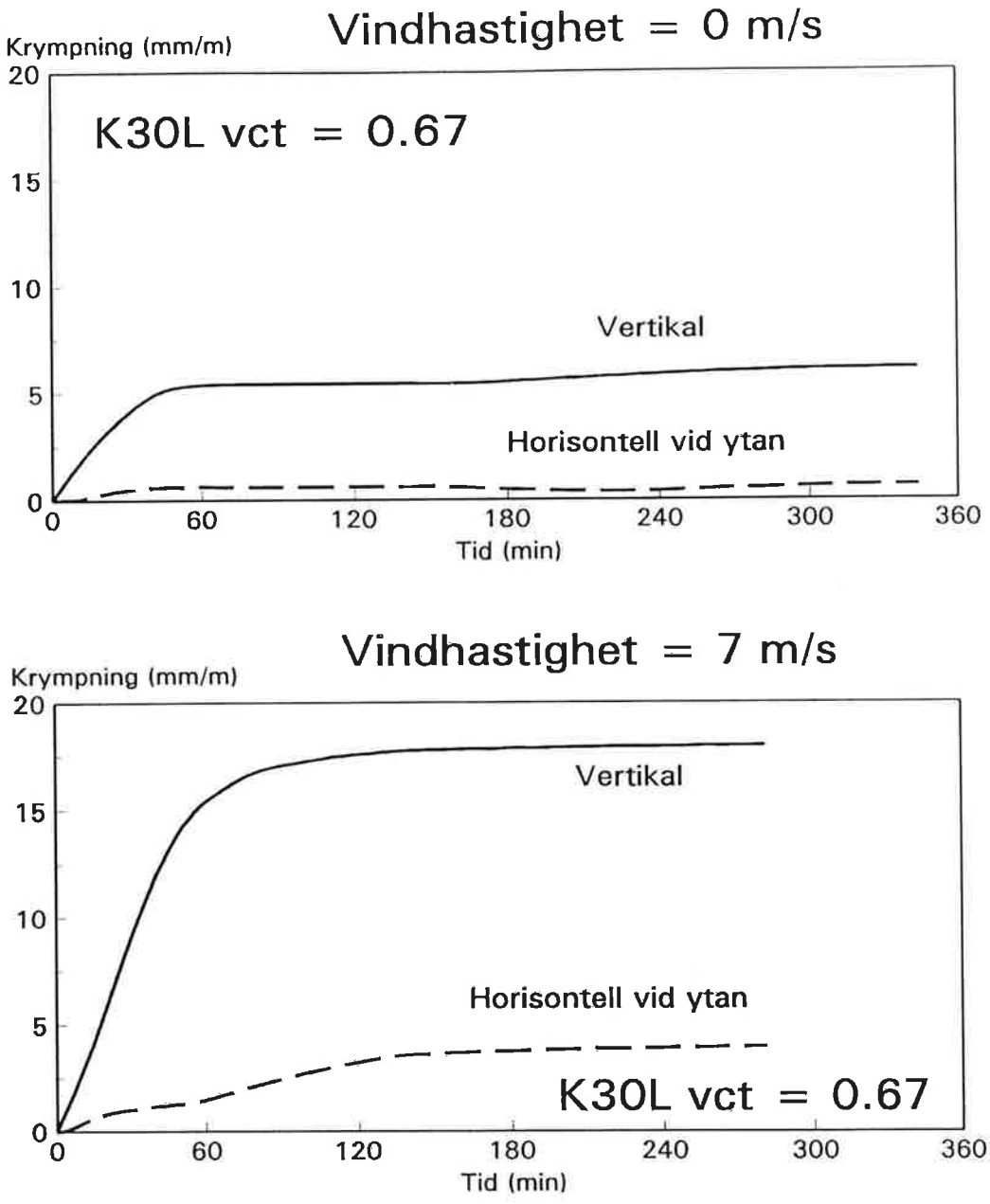
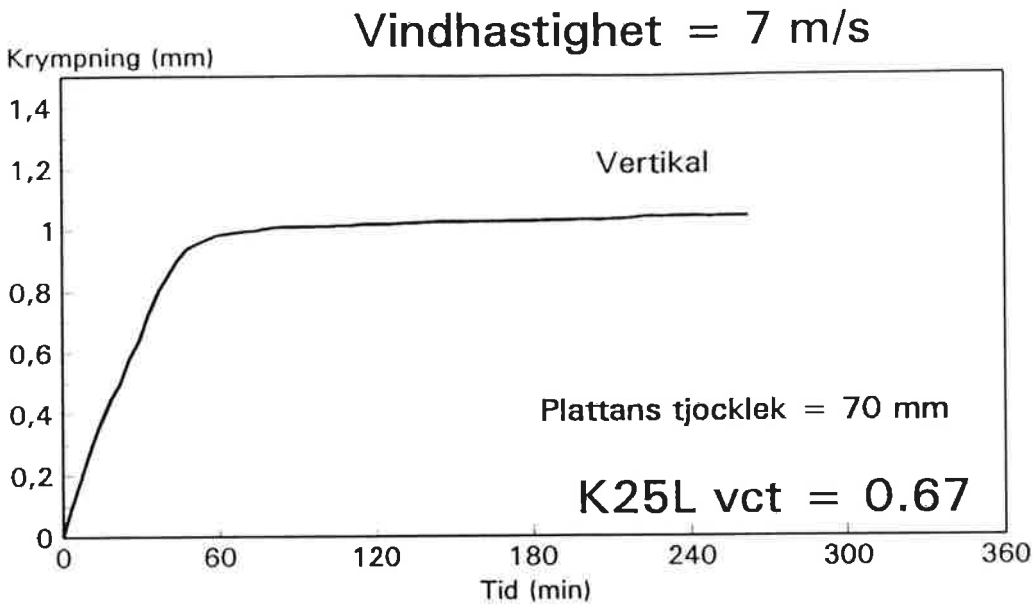


Fig. 6.5 Skillnaden mellan krympning vid låg och vid hög avdunstningshastighet.



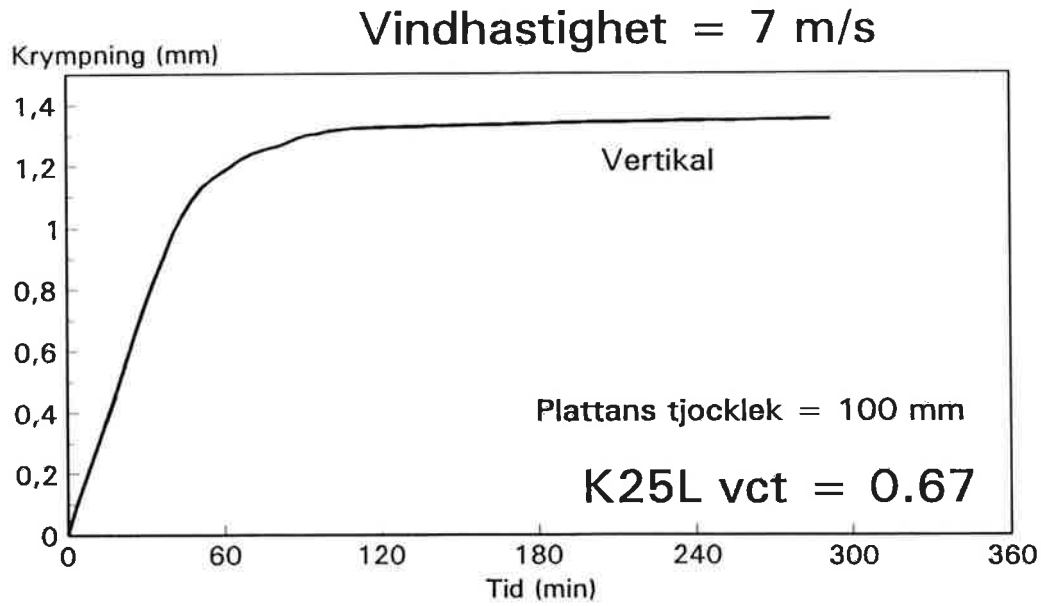


Fig. 6.6 Inverkan av plattans tjocklek.

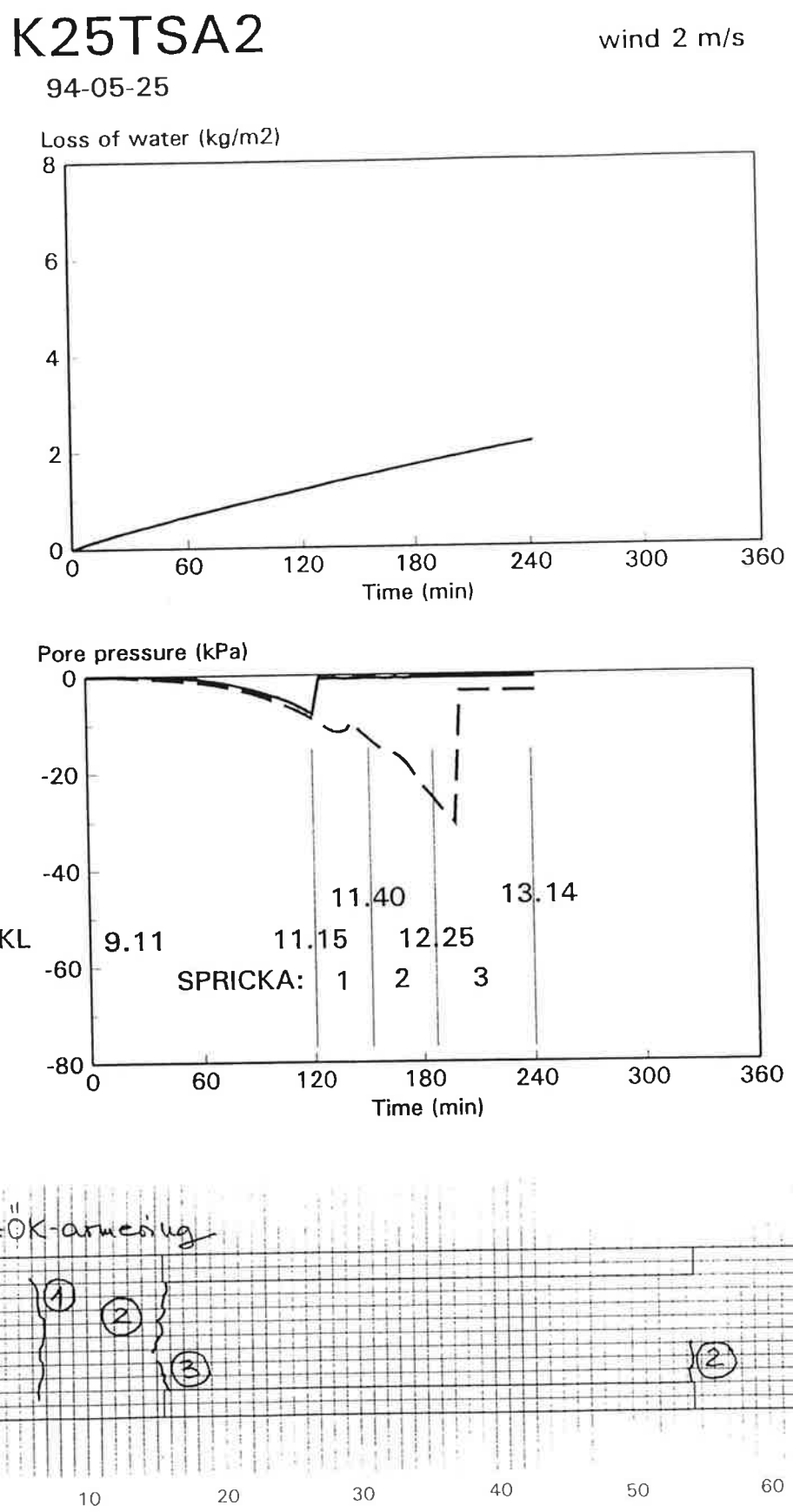


Fig. 6.7 Sprickbildning hos K25 trögflytande.

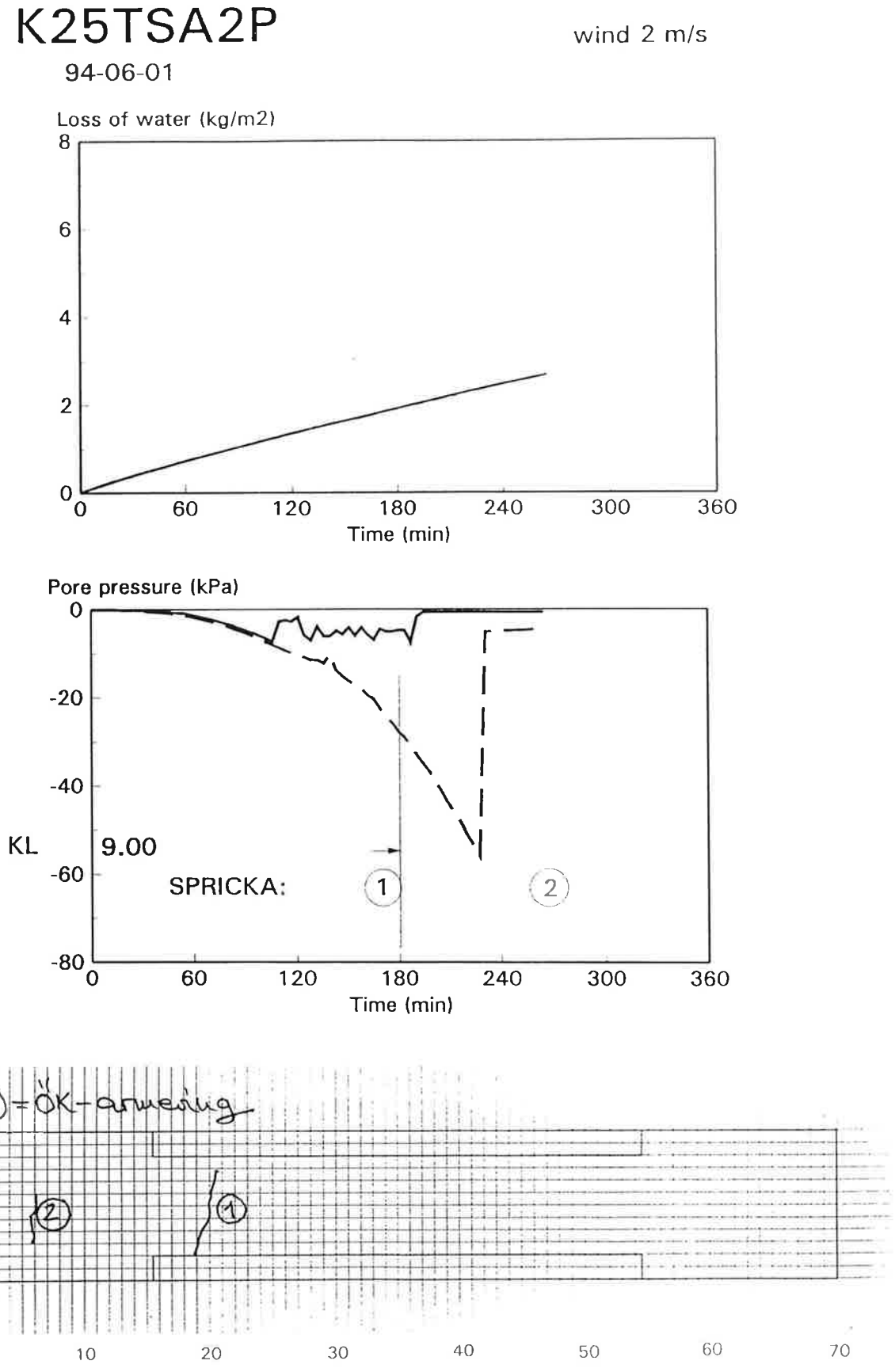


Fig. 6.8 Upprepning av samma försök som i Fig. 6.7.

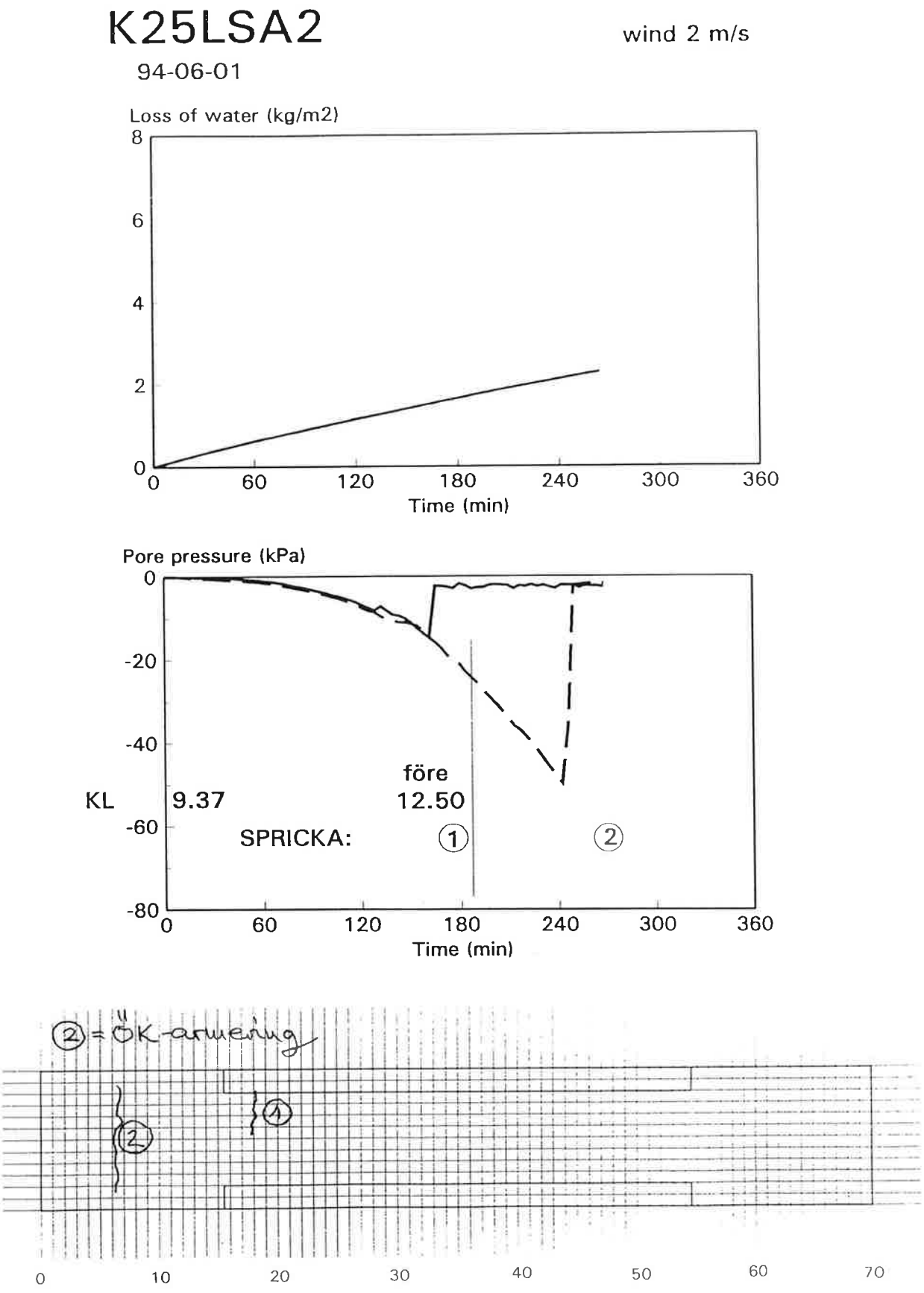


Fig. 6.9 Sprickbildning hos K25 lättflytande.

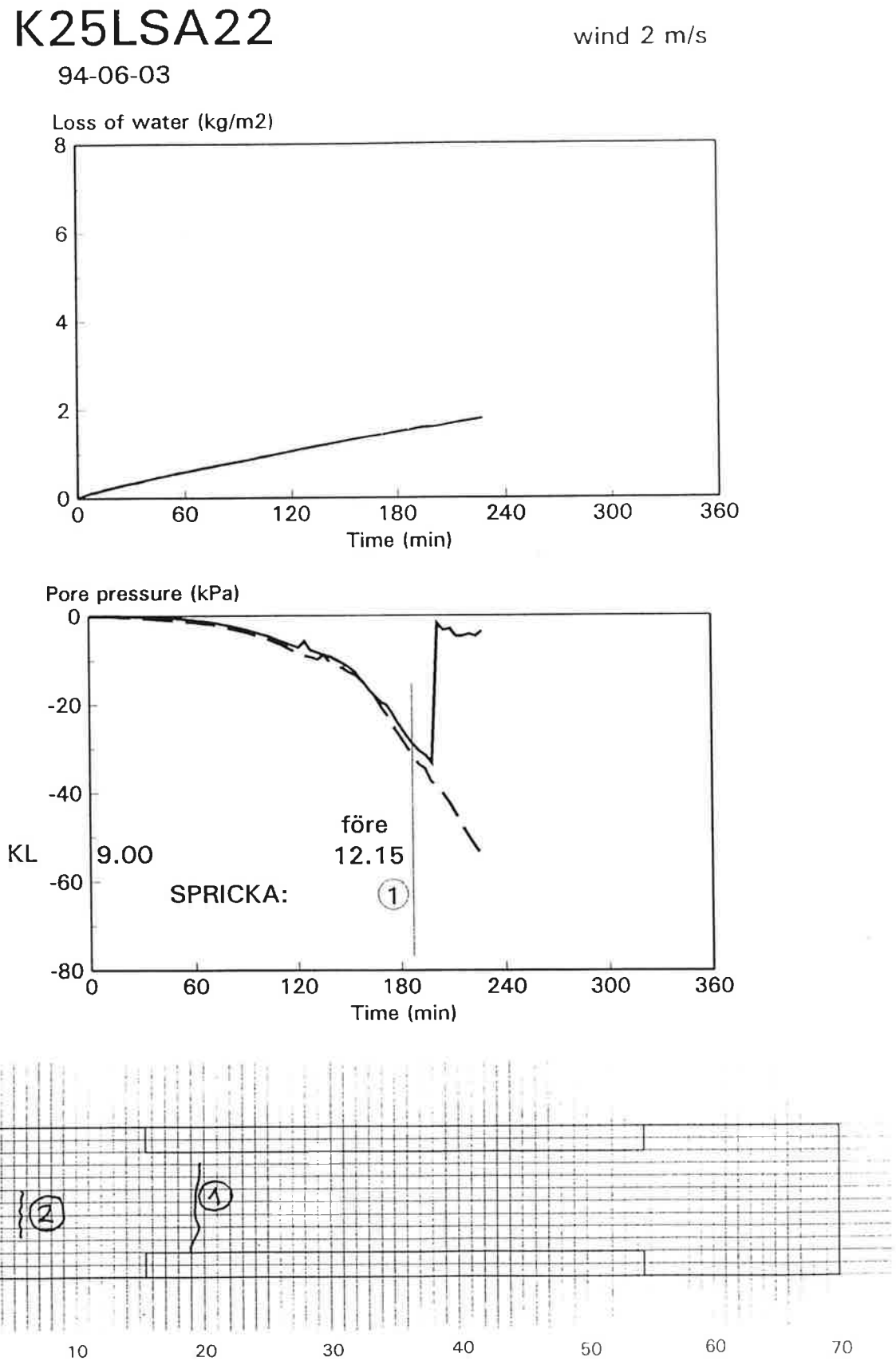


Fig 6.10 Upprepning av samma försök som i Fig 6.9.

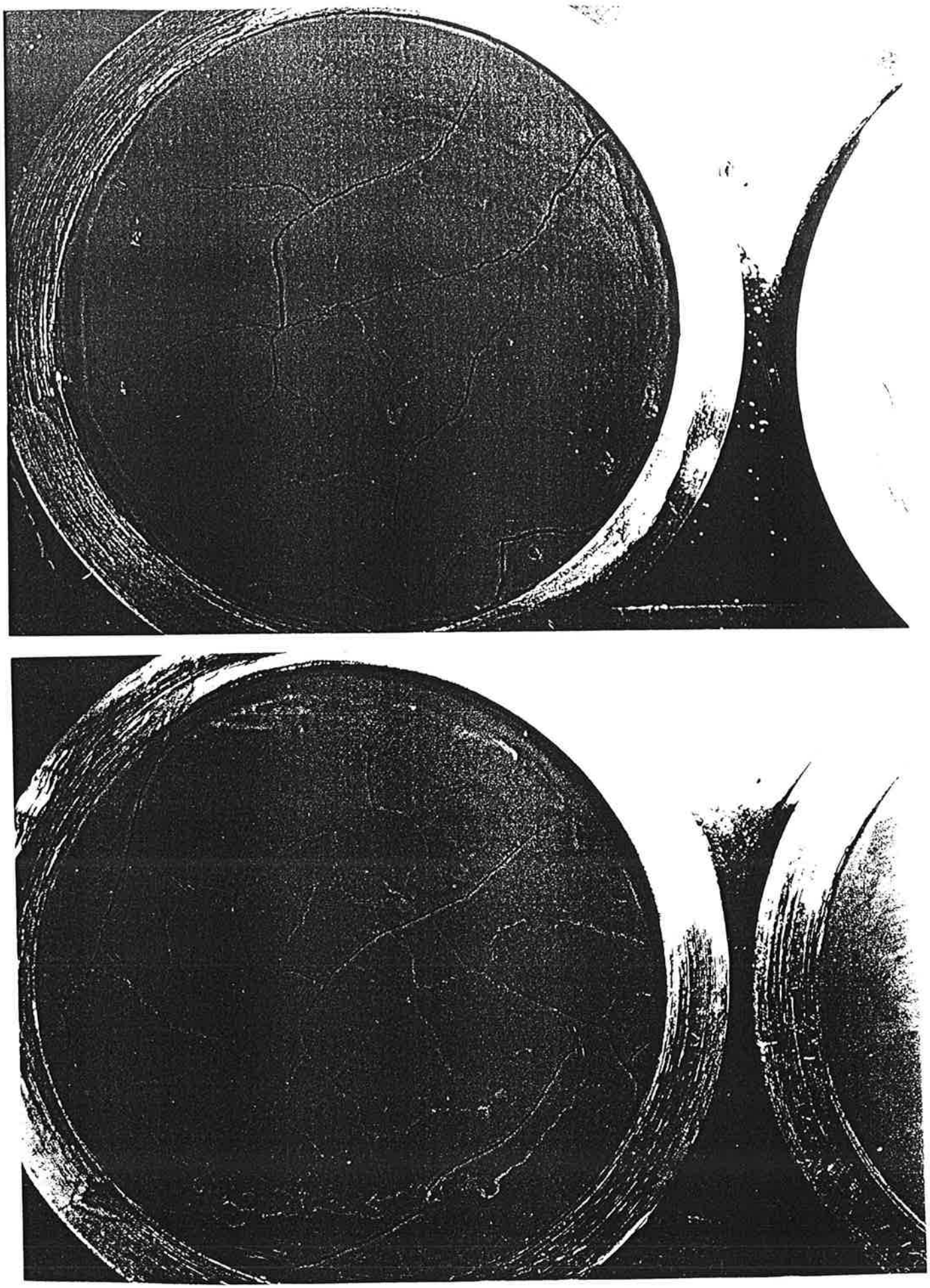


Fig. 6.11 Kraftig sprickbildning hos pasta med cement P400

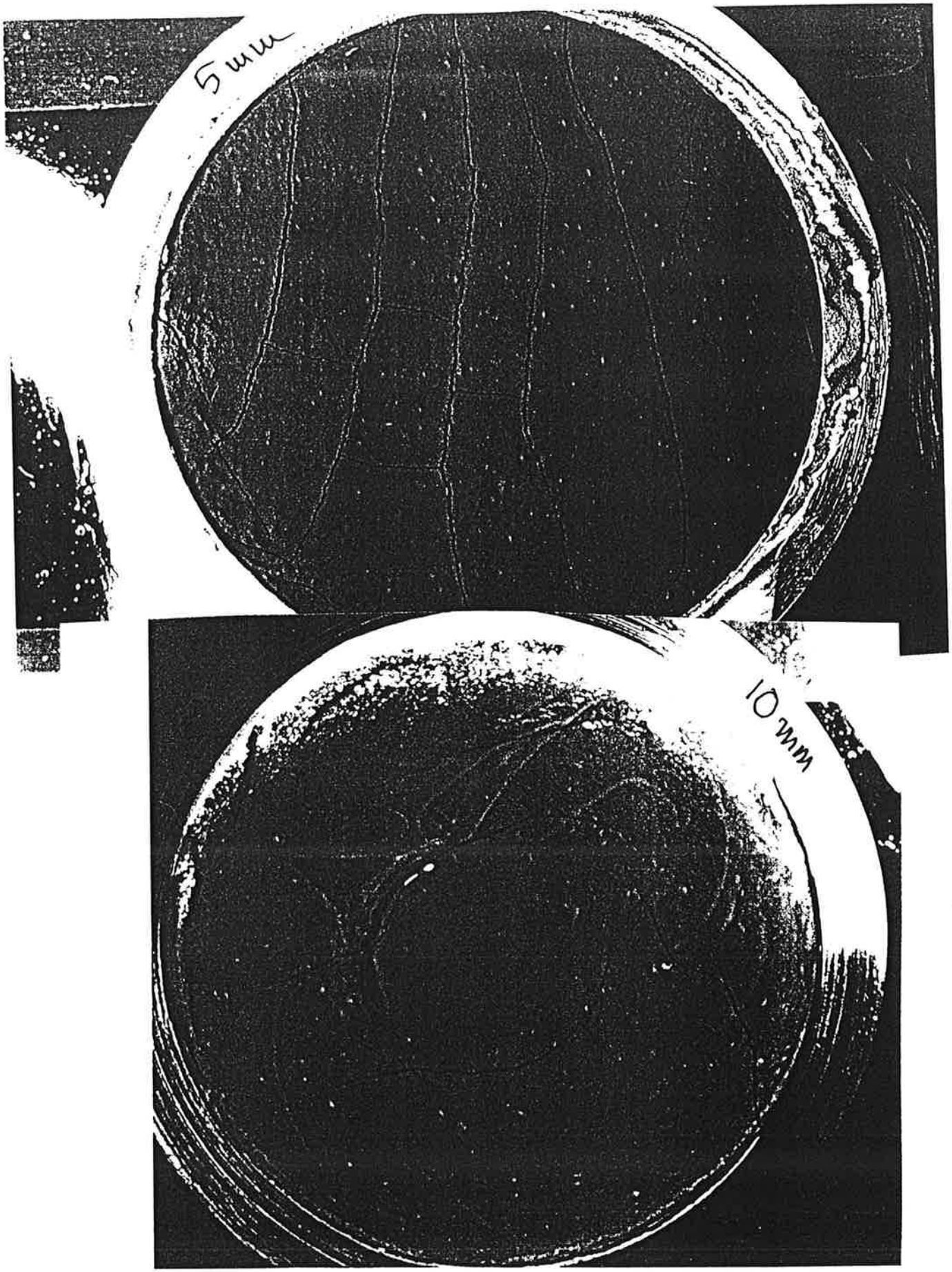


Fig. 6.12 Mycket kraftig sprickbildning hos pasta med Std Skövde och flyttillsats F92. Plator 5 och 10 mm tjocka.

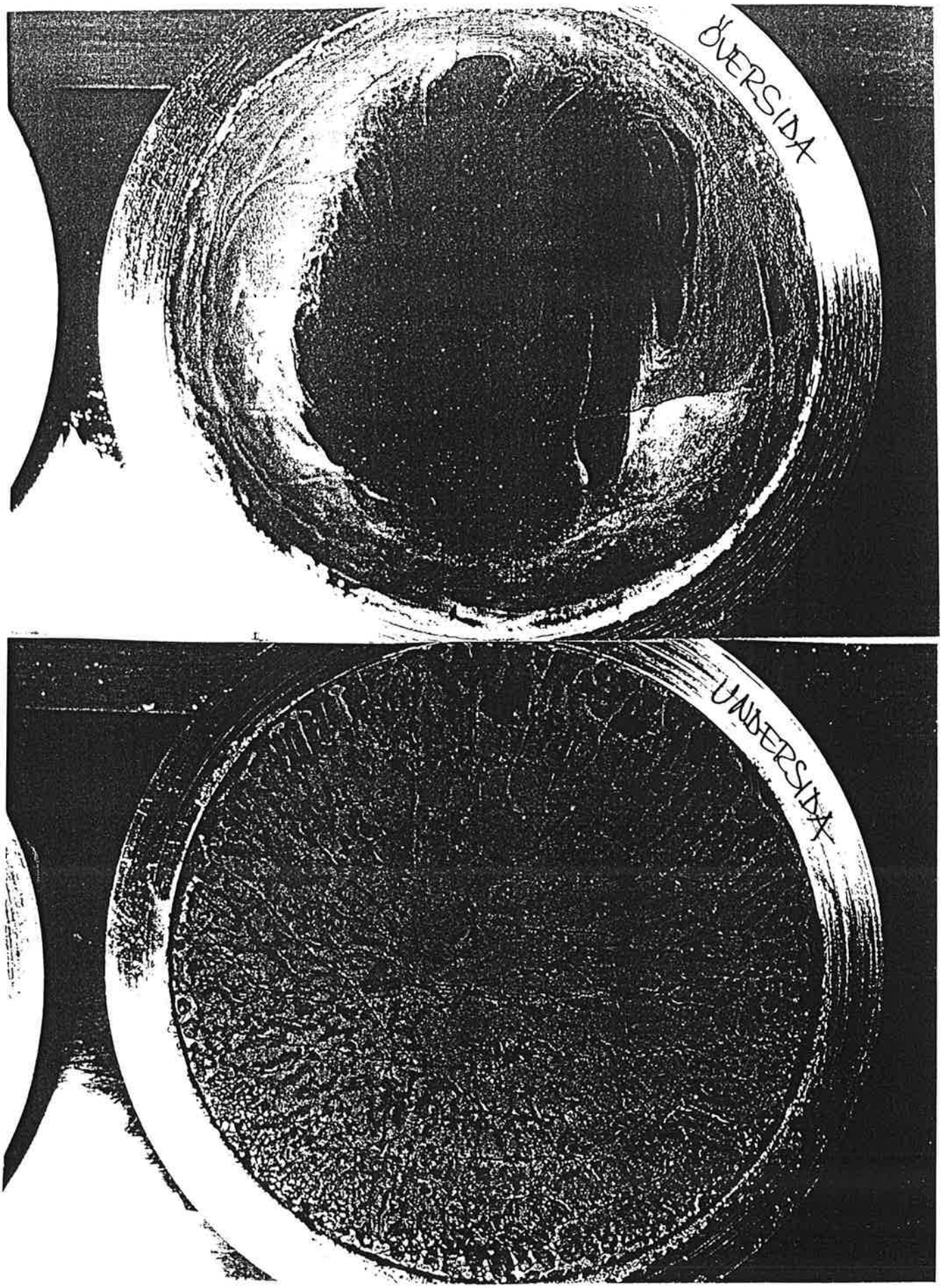


Fig. 6.13 Hårfina sprickor på översidan men karaftiga sprickor på undersidan. Std Skövde med flyttillsats Peramin.

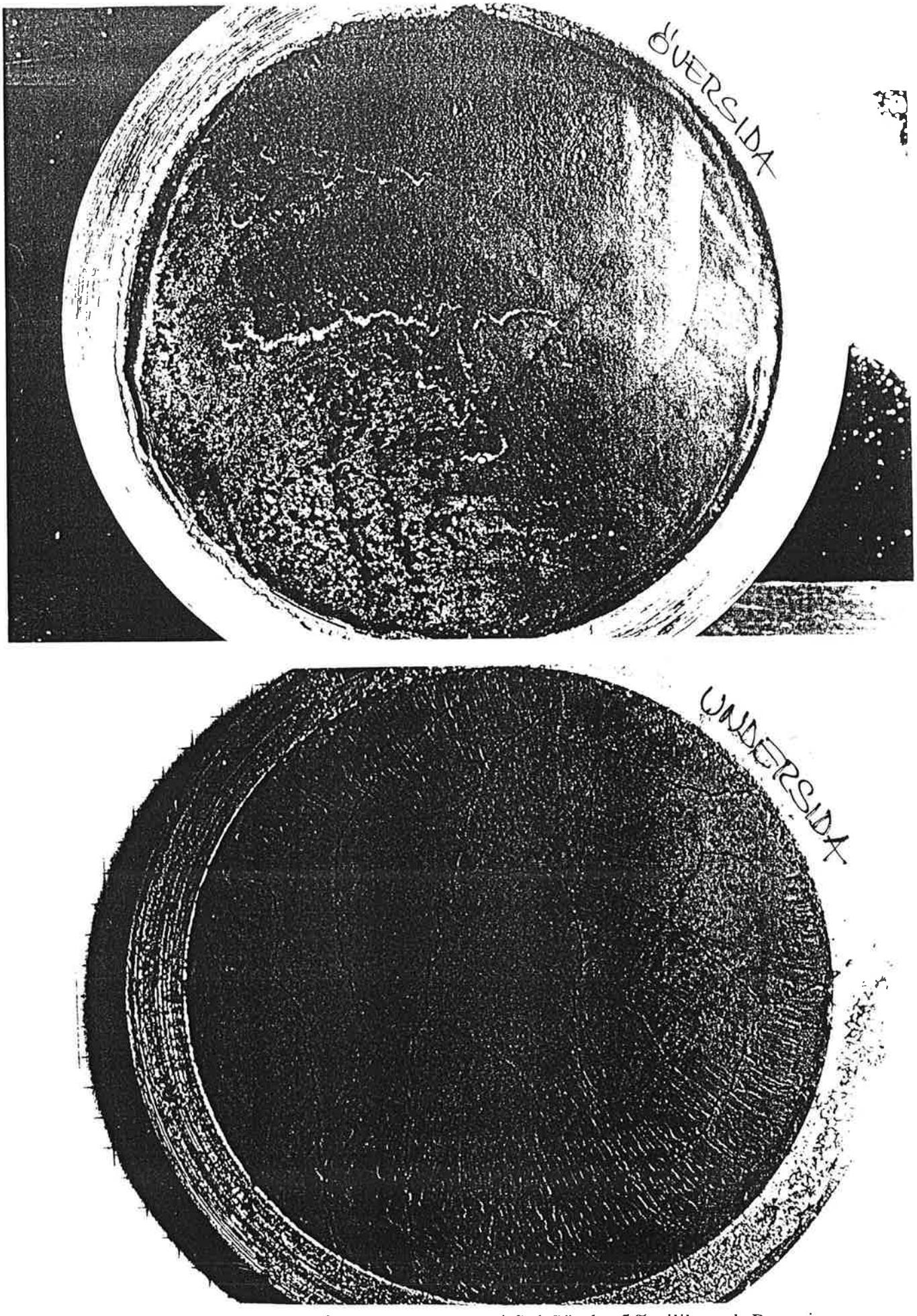


Fig. 6.14 Samma typ av sprickor hos pasta med Std Sövde; 5% silika och Peramin.

9 Referenser

[1] Baron, J., 1982, , General Report: Early cracking without external load, RILEM International Conference on Concrete at Early Ages. Vol. II, Page 75-112, Paris.

[2] Betonghandbok, 1982, AB Svensk Byggtjänst och Cementa AB, Stockholm, Sverige.

[3] Betongindustri Euroc, Torksprickor - motåtgärder, Teknisk information.

[4] Byfors, J., 1978, Betong i tidig ålder, Nordisk Betong - 2.

[5] Byfors, J., 1979, Properties of concrete at early ages, Studies on Concrete Technology, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Sweden.

[6] Byfors, J., 1980, Plain concrete at early age, Swedish Cement and Concrete Research Institute.

[7] Bjöntegaard, Ö. et al, 1993, Cracking of high strength concrete in the plastic state, Proceedings Nordic Concrete Research.

[8] Cabrera, J.G. et al, 1992, Effect of superplasticizers on the plastic shrinkage of concrete, Magazine of Concrete Research, 44, No 160, September.

[9] Campbell, R. H. et al, 1976, Job conditions affect cracking and strength of concrete in-place, ACI - Journal, Proc. Vol. 73 No 1.

[10] Cementa, 1974, Sprickbildning i nygjuten betong.

[11] Cohen, M.D. et al, 1990, Mechanism of plastic shrinkage cracking in Portland cement and Portland cement-silica fume paste and mortar, Cement and Concrete Research, Vol. 20, pp. 103-119.

[12] Dakhil, F.H. et al, 1975, Cracking of fresh concrete as related to reinforcement, ACI - Journal, August.

[13] Dahl, P.A., 1985, Plastisk svinn og risstendens for mörtel og betong tilsatt Fibermesh, Forskningsinstittutet for Cement og Betong, Trondheim - NTH.

[14] Dahl, P.A., 1985, Undersökelse av membranherdnere, Forskningsinstittutet for Cement og Betong, Trondheim - NTH.

[15] Dahl, P.A., 1986, Undersökelse av Betokem OM, Forskningsinstittutet for Cement og Betong, Trondheim - NTH.

[16] Dahl, P.A., 1988, Risstendens ved plastisk svinn for betong tilsatt Polycretefiber, Forskningsinstittutet for Cement og Betong, Trondheim - NTH.

[17] Dahl, P.A., 1988, Risstendens ved plastisk svinn for betong tilsatt Krenitfiber, Forskningsinstittutet for Cement og Betong, Trondheim - NTH.

[18] Dijk van J. and Boardman, V.R., 1971, Plastic shrinkage cracking of concrete, RILEM International symposium on concrete and rain.

[19] Hansen, J.H. and Kjaer, U., 1985, Udtörring af haerdnende beton, Dansk Beton nr. 3.

[20] Hansen, J.H. and Kjaer, U., Plastisk svind. Kemisk svind og udtörringssvind. Beton- og Konstruktionsinstittutet, Danmark.

[21] Hellström, B., 1972, Plastisk krympning - en litteraturöversikt, CBI rapport 7210.

[22] Jaegermann, C.H. and Glucklich, J., 1969, Effect of high evaporation during and shortly after casting on the creep behaviour of hardened concrete, RILEM Materiaux et constructions, Vol. 2, No 7.

[23] Johansen, R., 1980, Risstendens ved plastisk svinn, Forskningsinstituttet for

cement og betong ved NTH - tilsluttet SINTEF.
[24] Kasai, Y and Matsui, I., 1982, Shrinkage and cracking of concrete at early ages, RILEM International Conference on Concrete at Early Ages, Vol. I, Page 45-50, Paris.
[25] Kasai, Y. et al, 1970, Measuring method of early shrinkage of concrete, Review of the 24th general meeting of the cement association of Japan.
[26] Klieger, P., 1955, Effect of atmospheric conditions during the bleeding period and time of finishing on the scale resistance of concrete, Journal of the ACI, November.
[27] Learch, W., 1957, Plastic shrinkage, ACI Journal, February.
[28] Memon, A., 1982, Cracking of concrete bridge deck surface at early ages in Makkah Saudi Arabia, RILEM International Conference on Concrete at Early Ages, Vol. I, Page 243-246, Paris.
[29] Orr, D.M.F., 1982, Structure and strength of portland cement mixes at early ages, RILEM International Conference on Concrete at Early Ages, Vol. I, Page 57-61, Paris.
[30] Powers, T.C., 1968, The properties of fresh concrete, John Wiley & Sons, Inc.
[31] Radocea, A., 1991, Pore water pressure conditions in young cement paste: method of measurement, preliminary models and parameter studies, CTH-Göteborg Sweden, P-91:5, (in Swedish).
[32] Radocea, A., 1992, A study on the mechanism of plastic shrinkage of cement-based materials, CTH-Göteborg Sweden, P-92:2.
[33] Ravina, D. and Shalon, R., 1968, Plastic shrinkage cracking, ACI Journal, April.
[34] Rilem Commission 42-CEA, 1981, Properties of set concrete at early ages, State-of-the-art-report.
[35] Roper H. and Anderson T., 1982, Laboratory and site studies of early dimensional changes and crack development, RILEM International Conference on Concrete at Early Ages, Vol. I, Page 63-69, Paris.
[36] Sellevold, E.J. et al, 1986, Betongens funksjonsdygtighet - Volumeendringer og riss, Rapport Nr 3, SINTEF, Trondheim-NTH.
[37] Swayze, M.A., 1942, Early concrete volume changes and their control, Journal of ACI, Vol. 38.
[38] Wittmann, F.H., 1976, On the action of capillary pressure in fresh concrete, Cement and Concrete Research, Vol. 6 Page 49-56.
[39] Nordin, A & Westin, I,
[40] Thorsen, Å,

THE INFLUENCE OF SUPERPLASTICIZERS ON THE DEGREE OF FLOCCULATION OF CEMENT GRAINS

by

A. Radocea

ABSTRACT

The flocculation of cement grains in water, caused by attraction forces between the particles, depends on factors such as the concentration of solid material, mixing procedure and use of admixtures. The degree of flocculation, to a great extent influences the rheological and bleeding properties of fresh concrete, which affect concrete parameters that are relevant for plastic shrinkage and plastic shrinkage cracking: the time after placing when the surface concrete becomes dry and the period of plasticity of the cement paste.

The use of superplasticizers diminishes the flocculation, which affects the rheological properties positively. However, overdosage of superplasticizer can result in unstable pastes or pastes without bleeding.

It is shown that measurement of the changes in water pressure in suspensions of cement with water, as well as in freshly placed cement paste, is a powerful tool for the investigation of the effect of superplasticizers on the flocculation of cement grains. A quantitative definition of the degree of flocculation is proposed.

TABLE OF CONTENTS

ABSTRACT..... i

INTRODUCTION..... 1

PROPERTIES OF CEMENT AND SUPERPLASTICIZERS..... 2

MIXTURE PROPORTIONS..... 3

METHODS OF TESTING..... 3

EXPERIMENTAL RESULTS..... 4
Suspensions..... 4
Cement paste..... 4

CONCLUDING REMARKS..... 5

REFERENCES..... 6

TABLES

Table 1 Mixture proportions of cement pastes..... 7
Table 2 Minimum particle diameter and degree of flocculation..... 7

FIGURES

1 Development of pore water pressure in fresh cement paste..... 8

2 Particle size distributions of cement..... 8

3 Particle size distribution of the investigated types of cement..... 9

4 Equipment for measurement of pore water pressure..... 9

5 Cement paste D3 (W/C=0.3) with different amounts of superplasticizer M, in % of cement content..... 10

6 Changes in water pressure during sedimentation..... 10

7 Changes in pressure due to settlement in the paste D3 with different amounts of superplasticizer..... 11

8 Changes in pressure due to settlement and hydration in the paste P2 and P3 with different amounts of superplasticizer M..... 11

9 Changes in pressure due to settlement and hydration in the paste P3 with different amounts of superplasticizer F..... 12

10 Total volumetric contraction due to chemical shrinkage..... 12

INTRODUCTION

Cracking of normal and high performance concrete during the first few hours after placing has become a problem even in countries with favorable climatic conditions for concreting. The increase in the frequency of cracking of in-situ concrete slabs seems to be related to the spreading of the use of superplasticizers. The effect of superplasticizers on consistency, hydration and strength development of concrete has been studied intensively over the last 20 years. However, very little work concerning the influence of superplasticizers on the properties of fresh concrete which are relevant for plastic shrinkage has been carried out.

Most fresh cement pastes can be considered to be systems consisting of solid particles dispersed in a continuous liquid phase. Due to gravitation, cement solution, water absorption, capillary forces and hydration, the structure of a freshly placed cement paste undergoes different types of consolidation: settlement (bleeding), plastic shrinkage and chemical shrinkage. In all these cases, the amount of free water per unit volume of the paste diminishes.

It was shown in (1-3) that the process of consolidation of a sample of cement paste exposed to different climatic conditions can be studied by measuring the development of pore water pressure in the respective sample. Several curves representing possible developments in the pore pressure of a cement paste are shown in Fig. 1.

Immediately after placing, the cement particles are supported entirely by the mixing water, and the hydraulic pressure **P1** at a given depth exceeds the normal hydrostatic pressure **P2** at the respective depth. Due to the sedimentation of cement grains, the pressure decreases from **P1** to **P2** during a certain period of time **0-t1**; the time **t1** representing the total time of bleeding. The initial pressure **P1** depends on the density of the paste and the depth of measurement. During the period **t1-t2**, when the surface of the paste is covered by a plane layer of water and the rate of chemical reactions is still low, no significant change in the water pressure takes place. At time **t2**, when the surface of the water loses its planeness due to evaporation, the pressure begins to decrease again. Water menisci, which form on the surface of the paste at time **t2**, are not the only cause of negative pressure in a paste. This is shown by the decrease of the pressure in sealed and water cured samples after the time **t3**. Experimental results (1) show that the time **t3** is approximately equivalent for both sealed and water cured samples of the same cement paste.

The development of the water pressure, and consequently the times **t1**, **t2** and **t3**, are primarily dependent on the type of cement, W/C and climatic conditions.

The decrease in water pressure after the placing of a paste is balanced by an increase of compressive forces on the skeleton of solid particles. Thus, the degree of consolidation (contraction) depends on the amount of free water and on the rigidity of this skeleton. The development of pore pressure can therefore be regarded as the response of the structure consisting of solid particles when water is transferred through the paste.

The rigidity of the skeleton of cement grains, which in the beginning is almost entirely determined by interparticle forces, increases with the increasing degree of consolidation. The distance between the cement grains, i.e. the W/C and the degree of flocculation, together with the physical and chemical properties of cement are the main factors that determine the rheological properties of the paste during the first few hours after placing.

The purpose of this paper is to show that superplasticizers affect the degree of flocculation of cement grains and the rate of chemical reactions. The bleeding properties, as well as the rheological properties of the paste are consequently affected. The investigation presented hereby is not a parameter study, the meaning of it being mostly to show the fields of application of the method of measurement of the pore water pressure.

The degree of flocculation at different concentrations of superplasticizers is investigated by determining the development of water pressure in suspensions with a low concentration of cement particles. The testing method and the model that describes the relationship between the pressure development and the particle size distribution of cement are discussed in (2). The expression " degree of flocculation" is often used, especially in connection with cement and superplasticizers, in spite of the lack of a quantitative definition. A possible quantitative definition, based on the comparison between the particle size distributions of cement, is given below.

Consider the surfaces S_L, S_0 and S_C, limited by the axis representing the particle diameter, the cumulative weight and the curves **L**, **0** and **C**, in Fig. 2. The curve **L** is the particle size distribution of cement in ethanol, where no flocculation occurs. The curve **0** is determined for a cement paste with a high W/C, without superplasticizer and with a low quantity of energy supplied during mixing. The curve **C** is determined for the current paste. The degree of flocculation Φ is defined as:

$$\Phi = \frac{S_C - S_L}{S_0 - S_L} \qquad (1)$$

The effect of superplasticizers on the stability of the paste and the rate of chemical reactions are studied by investigating the development of pore water pressure in sealed samples of cement paste. The investigation of the rate of hydration is completed by the measurement of the total volumetric contraction of sealed samples.

PROPERTIES OF CEMENT AND SUPERPLASTICIZERS

Two types of cement were used:

1. P; normal portland cement of type Skövde: C3A=8%, alkali content=1,1%, time of setting=150 min., specific surface area=360-400 m^2/kg
2. D; sulphate resistent portland cement of type Degerhamn: C3A=2%, alkali content=0.5%, time of setting=150 min, specific surface area=300 m^2/kg.

Size-analysis curves of the two types of cement are shown in Fig. 3.

The superplasticizers were as follows:

1. M; Mighty 150, a naphthalene based solution
2. F; Flyt 92, a melamine based solution
3. P; Peramin-F, a melamine formaldehyde solution.

MIXTURE PROPORTIONS

Two mixing procedures were used:

A = small quantities of cement in the whole quantity of water during mixing

B = cement + W1 (W1/C=0.15) absorption 1 min
mixing 1 min
superplasticizer during mixing
mixing 0.5 min
W2 during mixing to stiff consistency
mixing 1.5 min
W3 during mixing 1 min
mixing 2 min
(W1+W2+W3=W)

The mixing procedure B was always used for cement pastes with superplasticizers.

The investigated cement pastes and the mixture proportions are shown in Table 1.

The suspensions were prepared by mixing a certain quantity of paste with water for 1 minute. The concentration of cement in all suspensions was 100 g cement/ liter water.

METHOD OF TESTING

The test method for continuous measuring of water pressure is described in detail in (1). A schematical representation of the equipment is shown in Fig. 4. The evaporation of water from the sample was prevented during all experiments.

The total volumetric contraction due to chemical shrinkage was evaluated by weighing a thin elastic membrane containing approx. 600 g cement paste that was placed in water. The temperature of the pastes varied between 20 and 23 °C during the first 24 hours.

EXPERIMENTAL RESULTS

In order to give the reader the possibility of understanding the measurements of the pore water pressure better, the pressure is expressed in mm water and not in SI units (the pressure represented by 1 mm water is approximately 10 Pa).

Suspensions

The sedimentation of cement grains in suspensions with a low concentration of solid material can, under certain conditions, be described by Stokes's law, which gives the settling velocity of a spherical particle that falls freely through a liquid. The conditions in particular involve particle diameter (0.0002-0.1 mm) and concentration.

The development of water pressure in a suspension actually represents the change in the density of the volume situated over the point of measurement, see Fig. 4. According to Stokes's law, the settling velocity of a particle is proportional to the second power of the particle diameter. This means that the time necessary for the density of the suspension to reach the density of pure water, which in our case is equivalent to zero pressure, is given by the minimum particle diameter in suspension.

The pressure development in Fig. 5.a and 6.b shows that the minimum particle diameter decreases with an increasing amount of superplasticizer. However, in the case of a higher amount of the superplasticizer M, 1.5 % with the cement D and 4 % with the cement P, the settling velocity during the first 200 seconds is almost equal to the settling velocity for suspensions prepared with cement pastes without superplasticizer. This fact indicates that, in the case of higher amounts of superplasticizer, some kind of agglomeration of the largest particles takes place.

The curves in Fig. 6.a show that the best deflocculation of cement D, at 1.5 % superplasticizer, is obtained when superplasticizer P is used.

By using the model described in (2), the curves in Fig. 5.a were used to calculate the particle size distribution of cement D with different amounts of superplasticizer M, see Fig. 5.b. The viscosity of the suspensions was determined without finding any significant changes with the increasing amount of superplasticizer. The particle size distribution of cement D determined with the laser method is also indicated in the diagram. For cement D with superplasticizer M, the minimum particle diameter and the degree of flocculation are shown in Table 2. According to the figures in Table 2, the degree of flocculation is also influenced, as can be expected, by the mixing procedure.

Cement paste

It was shown in (2) that, during the dormant period, the rate of pressure

progress in a cement paste is proportional to the rate of bleeding. A high rate of pressure progress therefore indicates a high rate of bleeding. After the time of setting, the decrease in water pressure is no longer caused by the settlement of cement grains, but by the consumption of water due to physical and chemical processes and an increase in the rigidity of the skeleton of cement grains.

The diagrams in Fig. 7, 8 and 9 show that the development of pore water pressure is to a great extent influenced by the amount of superplasticizer. The rate of pressure progress diminishes when higher amounts of superplasticizer are used, which results in very stable pastes without bleeding. This is however not the case for cement D with superplasticizer M, see Fig. 7.a. An overdosage of the superplasticizer (1.5 % in this case) causes a high instability of the paste, which is characterized by a high density gradient over the thickness of the sample: a settled layer consisting of the largest particles at the bottom and a slurry at the top of the sample. The structure of the paste 0/A (no superplasticizer and mixing procedure A) is on the contrary characteristic for normal bleeding; no density gradient and a layer of water on the surface of the paste.

The influence of the superplasticizer on the bleeding properties of cement paste can be explained by a low degree of flocculation, which implies a reduced distance between the cement grains and consequently a lower quantity of bleeding water.

The superplasticizer usually has an effect of retardation of the chemical reactions. This effect seems to increase according to the diagrams in Fig. 8.a, 8.b and 9. The same effect is shown by the development of the total volume deformation, see Fig. 10. The only exception is the paste of cement D with superplasticizer F.

CONCLUDING REMARKS

Measurements of changes in water pressure in suspensions and freshly placed cement paste provide us with a powerful tool for determining suitable systems of superplasticizers and binders.

The effect of a certain superplasticizer on the degree of flocculation and the stability of cement pastes prepared with a certain type of cement can be quantified.

The degree of flocculation usually decreases with an increasing amount of superplasticizer. There are however systems in which a distinct segregation takes place. This segregation results in an unstable paste with important consequences on the workability of the concrete.

The results presented in this paper are part of a bigger project concerning plastic shrinkage cracking.

REFERENCES

1. Redocea, A., Pore Water Pressure Conditions in young Cement Paste-Method of Measurement, Preliminary Models and Parameter Studies, in Swedish, CTH-Gothenburg, Sweden, 1991.

2. Radocea, A., A New Method for Studying Bleeding of Cement Paste, Cement and Concrete Research, V. 22, No. 5, 1992.

3. Radocea, A., A Study on the Mechanism of Plastic Shrinkage of Cement-Based Materials, CTH-Gothenburg, Sweden, thesis, 1992.

4. Radocea, A., A Model of Plastic Shrinkage, to be published in Magazine of Concrete Research.

Table 1 Mixture proportions of cement pastes.

PASTE	MIXING PROCEDURE	W/C	CEMENT (g)	W1 (g)	W2+W3 (g)
D1	A, B	0.55	1500	225	600
D2, P2	A, B	0.4	1800	270	450
D3, P3	A, B	0.3	2000	300	300

Table 2 Minimum particle diameter and degree of flocculation.

Paste & mixture procedure	**D_{MIN}**	**Φ**	**Paste & mixture procedure**	**D_{MIN}**	**Φ**
D1A	27	1	D3B	23	0.56
D1B	26	0.61	D3M1B	17	0.62
D2A	26	0.85	D3M2B	15	0.35
D2B	24	0.66	D3M3B	15	0.34
D2MB	21	0.39	D3M4B	14	0.42
D3A	26	0.89	D3M5B	8	0.17

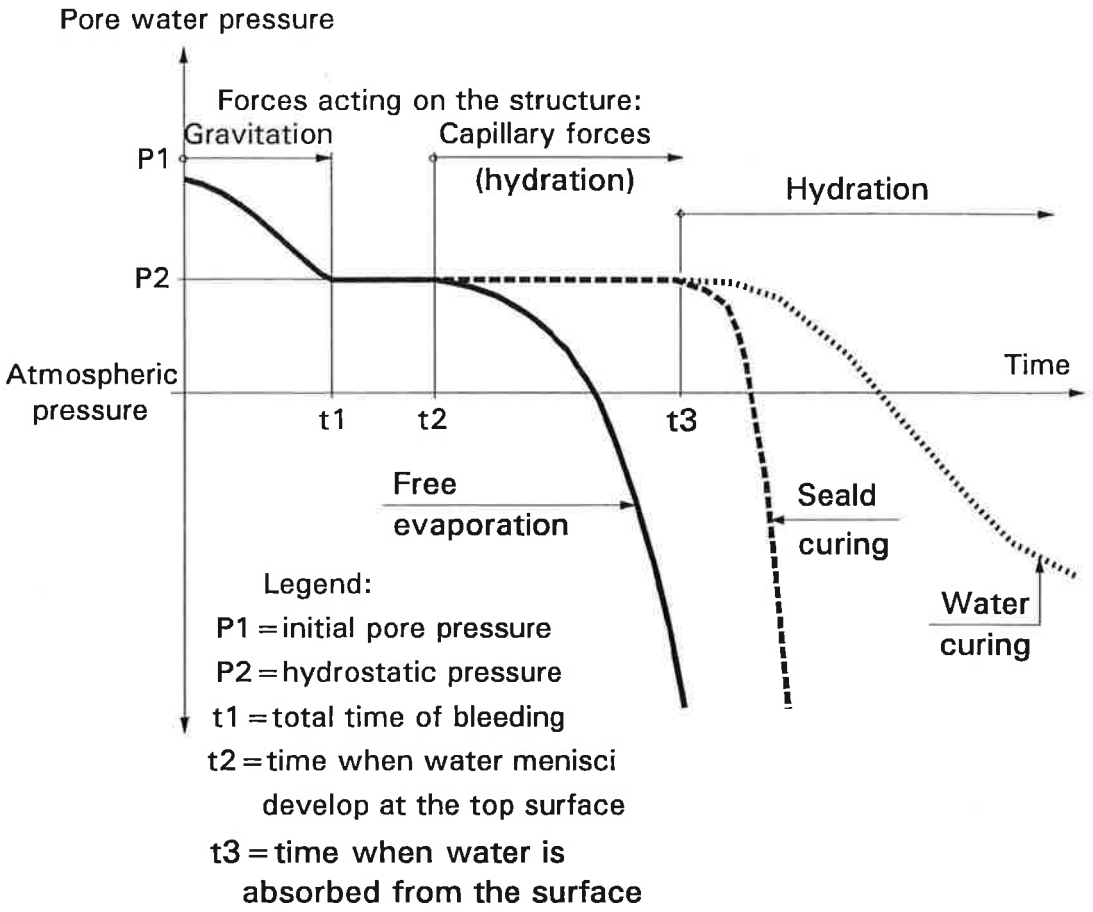


Fig. 1 Development of pore water pressure in fresh cement paste.

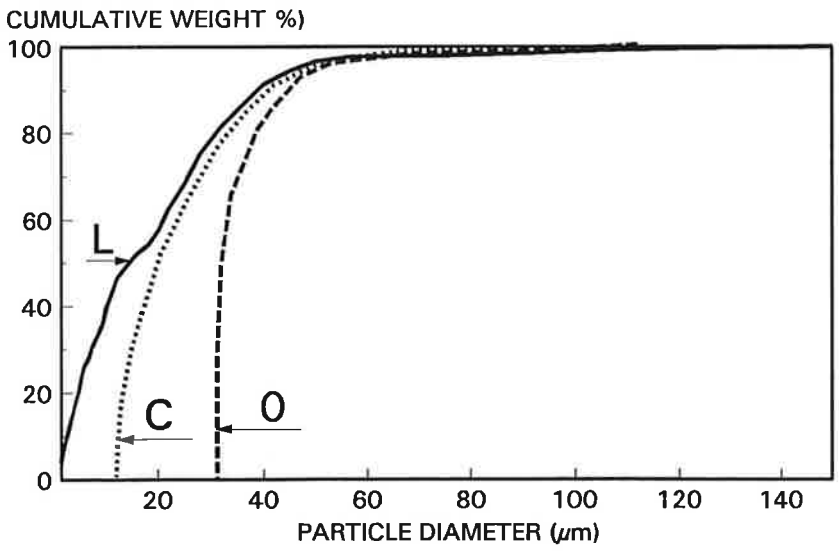


Fig. 2 Particle size distributions of cement.

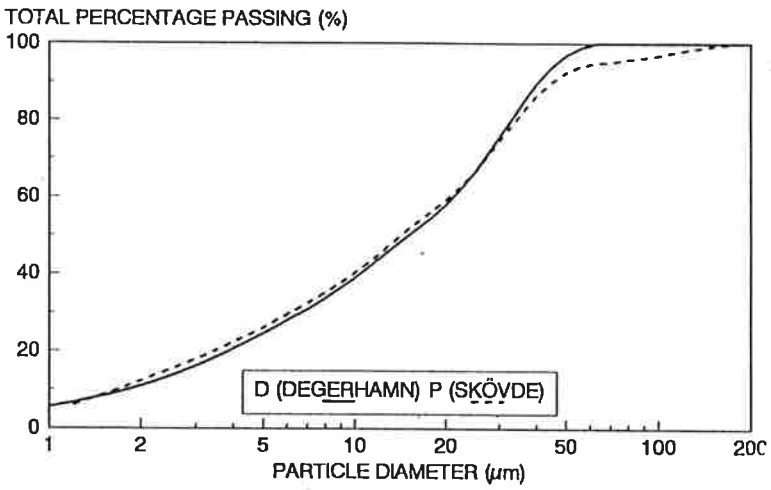


Fig. 3 Particle size distribution of the investigated types of cement.

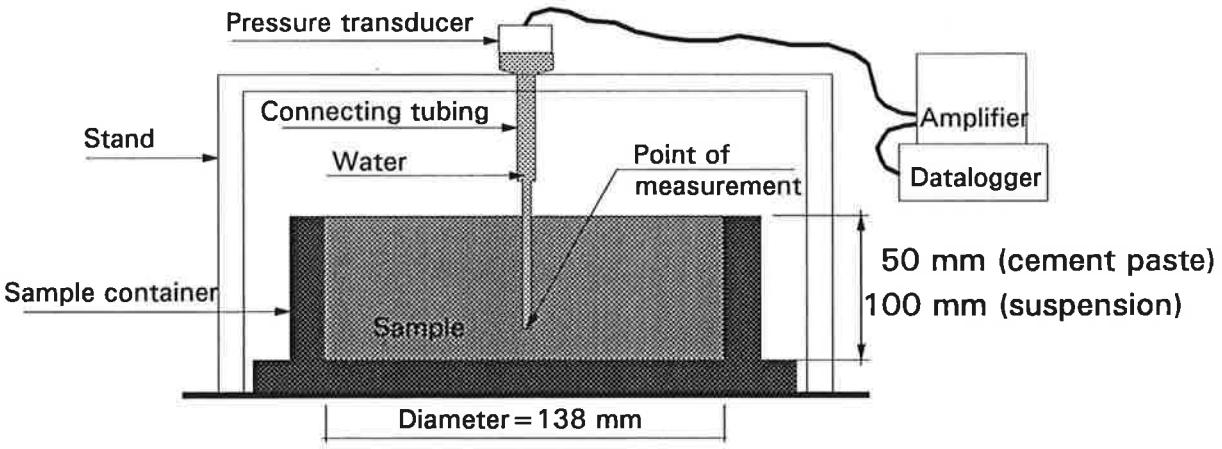
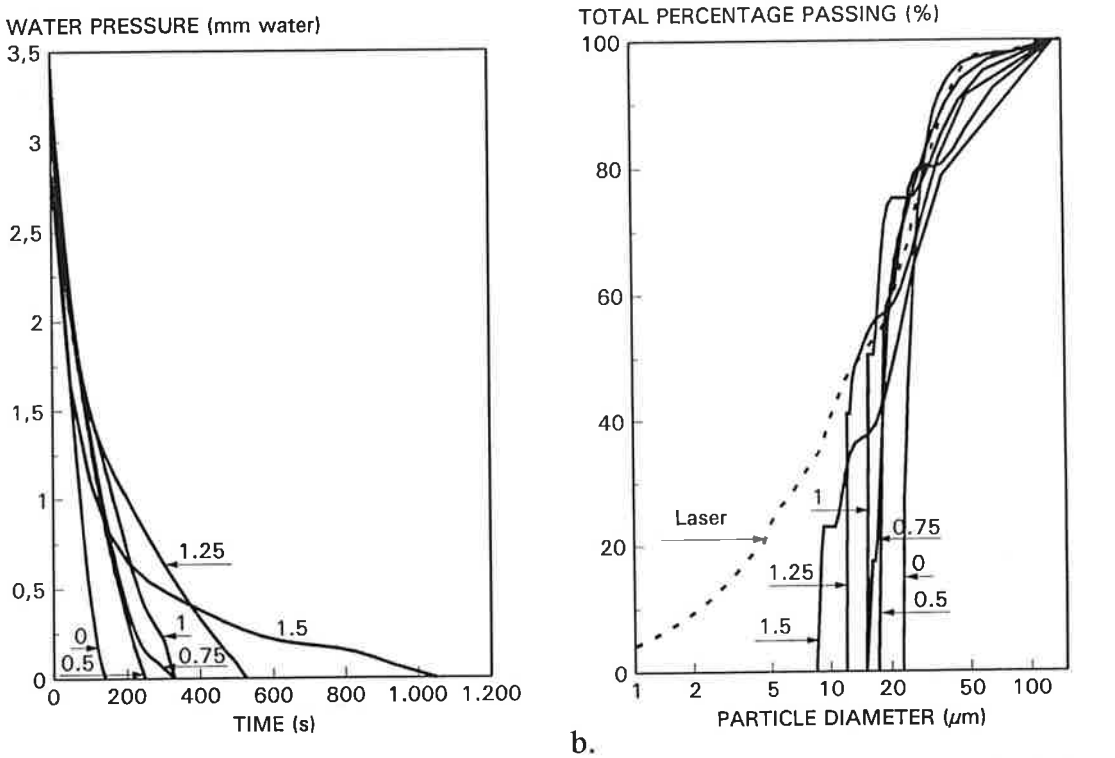
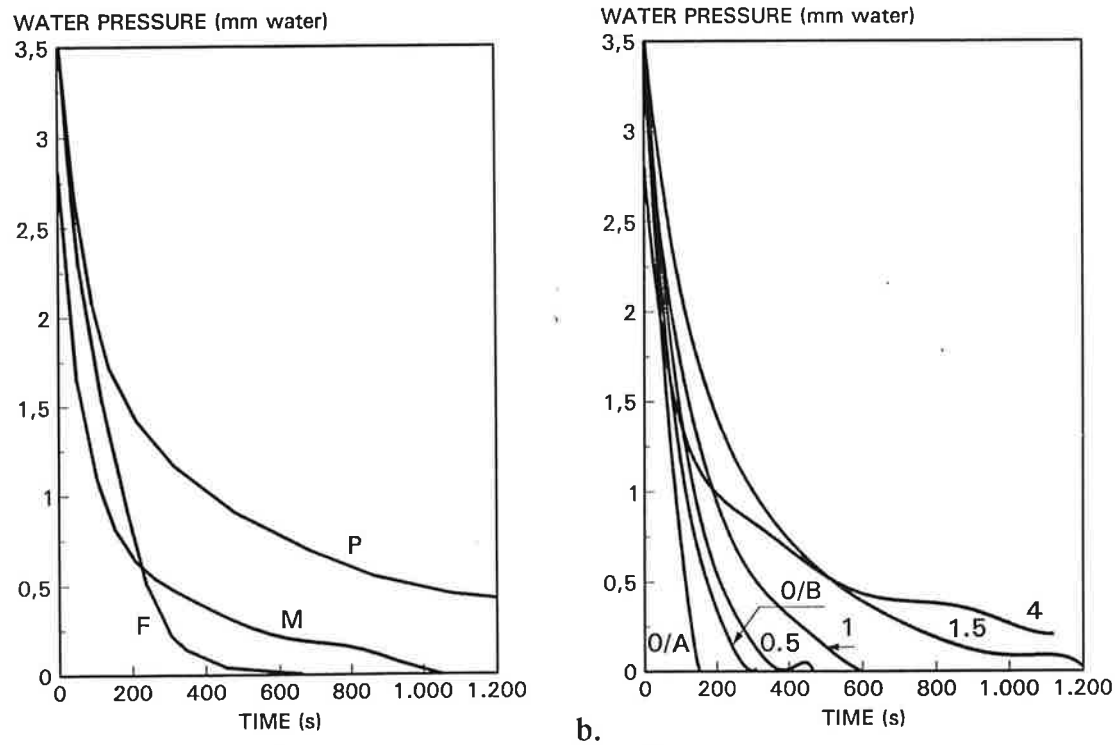


Fig. 4 Equipment for measurement of pore water pressure.



a. b.

Fig. 5 Cement paste D3 (W/C=0.3) with different amounts of superplasticizer M, in % of cement content:
a. changes in water pressure during sedimentation
b. calculated particle size distributions.



a. b.

Fig.6 Changes in water pressure during sedimentation:
a. paste D3 with 1.5 % superplasticizer M, F and P
b. paste P4 (W/C=0.4) with different amounts of superplasticizer M, in % of cement content.

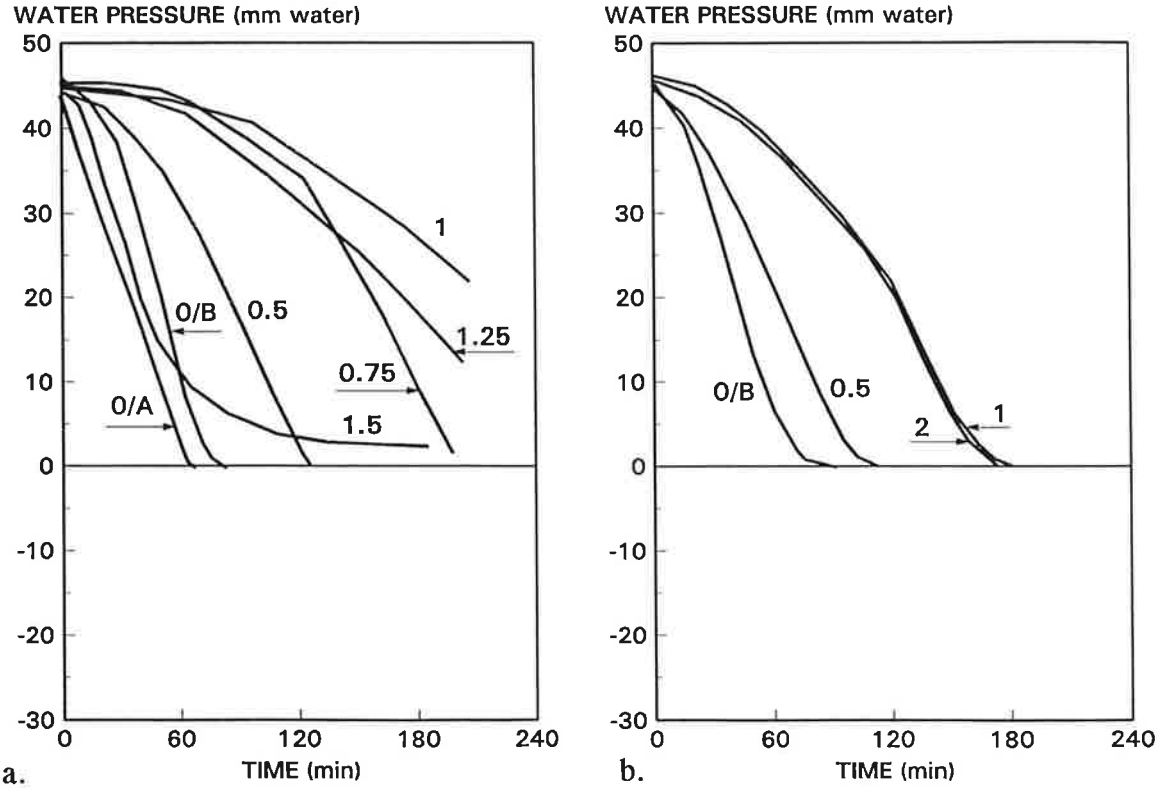


Fig. 7 Changes in pressure due to settlement in the paste D3 with different amounts of superplasticizer:
a. superplasticizer M
b. superplasticizer P

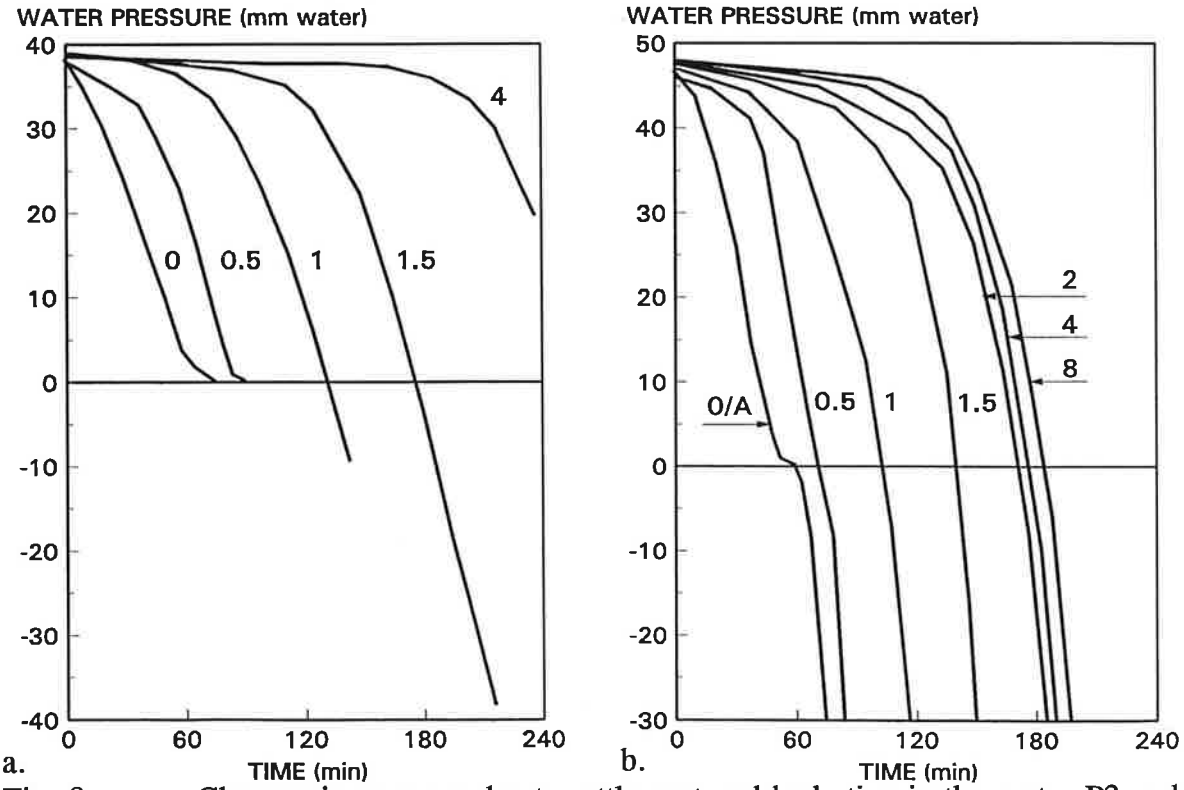


Fig. 8 Changes in pressure due to settlement and hydration in the pastes P2 and P3 with different amounts of superplasticizer M:
a. P2
b. P3

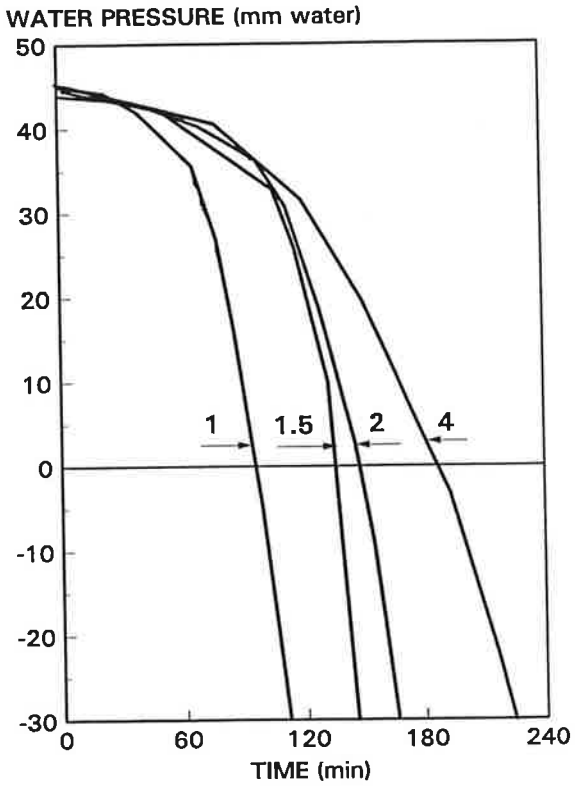
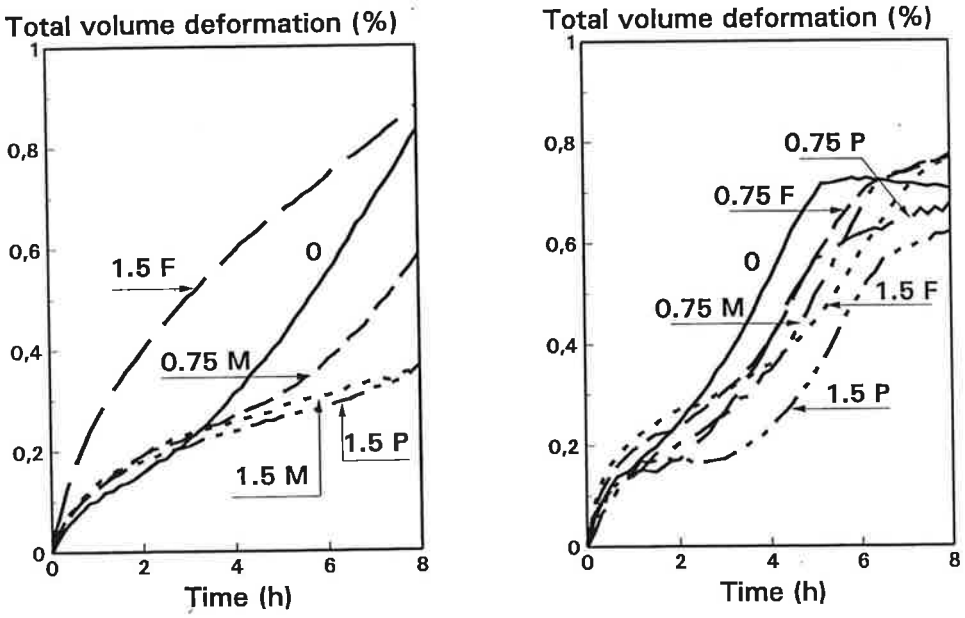


Fig. 9 Changes in pressure due to settlement and hydration in the paste P3 with different amounts of superplasticizer F.



a. b.

Fig. 10 Total volumetric contraction due to chemical shrinkage:
a. cement pastes with cement D
b. cement pastes with cement P.