



LUND UNIVERSITY

Sprickbildning i puts på isolering - undersökning av grundläggande mekanismer

Hassanzadeh, Manouchehr

2004

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

Hassanzadeh, M. (2004). *Sprickbildning i puts på isolering - undersökning av grundläggande mekanismer*. (Rapport TVBM; Vol. 3117). Avd Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola.

Total number of authors:

1

General rights

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

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

Take down policy

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

LUND UNIVERSITY

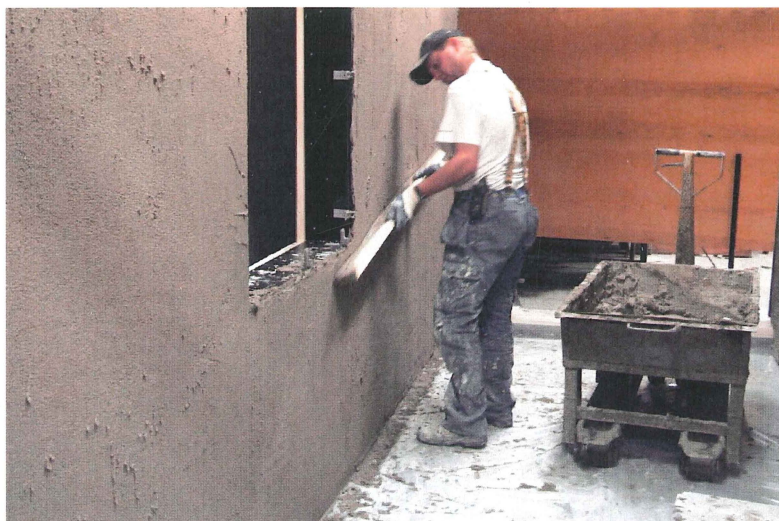
PO Box 117
221 00 Lund
+46 46-222 00 00

LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA
LUNDS UNIVERSITET

Avd Byggnadsmaterial

SPRICKBILDNING I PUTS PÅ ISOLERING **Undersökning av grundläggande** **mekanismer**

Manouchehr Hassanzadeh



LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA
LUNDS UNIVERSITET

Avd Byggnadsmaterial

SPRICKBILDNING I PUTS PÅ ISOLERING
Undersökning av grundläggande me-
kanismer

Manouchehr Hassanzadeh

ISRN: LUTVDG/TVBM--04/3117--SE (1-72)

ISSN: 0348-7911 TVBM

Lunds Tekniska Högskola
Byggnadsmaterial
Box 118
www.byggnadsmaterial.lth.se

Tel: 046-2227415
Fax: 046-2224427

221 00 LUND

FÖRORD

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

Denna rapport avser redovisning av den undersökning som har gjorts för att identifiera de grundläggande mekanismerna som leder till att putsen spricker. Denna rapport är en fortsättning på en tidigare rapport ”*SPRICKBILDNING I PUTS PÅ ISOLERING – Inledande laboratieförsök och parameterstudier*”. Föreliggande rapport såsom den tidigare redovisar de teoretiska och experimentella parameterstudier som hittills har genomförts inom SBUF-proj 8106 ”**Beständighet hos putsade fasader**”. Syftet med parameterstudierna är att skapa en uppfattning om hur olika faktorer påverkar sprickbildning i puts på isolering. Rapporten bygger även på resultat redovisade i andra rapporter inom detta projekt. Rapporterna är ”*SPRICKBILDNING I PUTS PÅ ISOLERING – Inledande studier av putsens krympning och svällning*” och ”*SPRICKBILDNING I PUTS PÅ ISOLERING – Inledande försök på provväggar*”.

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

Lund i april 2004

Manouchehr Hassanzadeh

SAMMANFATTNING

Denna rapport presenterar provningar och beräkningar utförda för att fastställa de mekanismer som ligger bakom sprickbildning i puts på isolering. Den här typen av puts kännetecknas av ett putsskikt, 10 – 20 mm, som appliceras på isolering. Isoleringen utgörs normalt av mineralull eller cellplast. För att hålla fast putsen och förebygga sprickbildning monteras ett armeringsnät som i sin tur fästs i underlaget med kramlor.

Provningarna utfördes på oarmerade och armerade putsremsor (längd = 700 mm, bredd = 60 mm, tjocklek = 10 mm och 20 mm) genom att utsätta dem för upprepad uttorkning och uppfuktning. I de armerade remsorna var armeringen placerad excentrisk i förhållande till remsans längdaxel, närmare bestämt 2 mm från ena kanten.

Genom att mäta putsremsornas deformationer i olika riktningar konstaterades att en oarmerad putsremsa deformeras axiellt på grund av krympning och böjs/kröks på grund av ojämn fuktfördelning genom remsans tjocklek (fuktgradient).

Den armerade putsremsans axiella deformation var mindre jämfört med den oarmerade remsan. Anledningen bedömdes vara att armeringen motverkade brukets krympning. De armerade strimlorna visade kraftig krökning. Större delen av krökningen orsakades av den excentriskt placerade armeringen. Armeringen medförde, genom att förhindra krympningen i den kant den satt, en ojämn tøjningsfördelning över putsremsans tjocklek vilken gav upphov till krökningen.

I en verklig situation förhindras krökningen av kramlor. Denna effekt tillsammans med inverkan av fuktgradient och förhindrade axiella krymprörelser, som orsakas av armeringen, bedömdes vara anledning till sprickbildning i puts på isolering. Det bör noteras att i verkligheten tillkommer ytterligare effekter såsom temperaturgradient och vindlaster. Dessa har inte beaktats vid denna undersökning.

De experimentella resultaten har kompletterats med teoretiska studier för att förklara och förstå de experimentellt erhållna resultaten. De teoretiska studierna är utförda både med analytiska och numeriska metoder.

De erhållna resultaten har även använts till att förklara vissa iakttagelser gjorda i försök med provvägar i stor skala genomförda i laboratoriet.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1	INLEDNING.....	9
1.1	Allmänt.....	9
1.2	Problembeskrivning	9
1.3	Tidigare arbete inom området	10
2	DEFORMATION HOS PUTSREMSOR.....	13
2.1	Försöksuppställning	13
2.2	Putsbruk.....	15
2.3	Provningsresultat.....	15
2.3.1	Presentation av resultat.....	15
2.3.2	Kommentar till resultaten.....	23
2.3.3	Brottmekaniska egenskaper.....	27
2.4	Teoretisk behandling av resultaten.....	29
2.4.1	Uttorkning av putsremsa	29
2.4.2	Samband mellan fri krympning och relativ fuktighet	32
2.4.3	Spänningar och deformationer hos oarmerad putsremsa	33
2.4.4	Spänningar och deformationer hos armerad putsremsa	38
2.5	Möjliga förhållanden vid andra experimentella förutsättningar.....	43
2.6	Spricktillväxt i putsremsor utsatta för jämn krympning och tvång	44
2.6.1	Inledning.....	44
2.6.2	Simuleringsförutsättningar	44
2.6.3	Simuleringsresultat.....	46
3	DEFORMATIONER OCH SPÄNNINGAR I PUTSADE VÄGGAR.....	55
3.1	Teoretiska studier	55
3.1.1	Inledning.....	55
3.1.2	Simuleringsförutsättningar	55
3.1.3	Simuleringsresultat.....	56
3.2	Jämförelse med provning av putsade väggar i stor skala	63
4	SLUTSATSER.....	67
5	FRAMTIDA ARBETEN.....	69
5.1	Experimentellt arbete	69
5.2	Teoretiskt arbete.....	69
6	REFERENSER.....	71

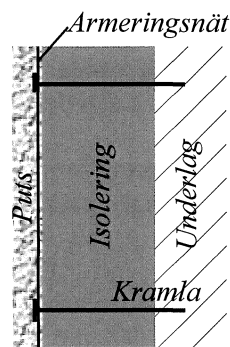
1 INLEDNING

1.1 Allmänt

Puts på isolering är idag ett av de vanligaste fasadsystemen i Sverige. Både arkitektoniska och ekonomiska skäl ligger bakom detta. Någon heltäckande vetenskaplig beskrivning av hur puts på isolering fungerar finns dock inte. Systemen har till stor del utvecklats med utgångspunkt från praktisk erfarenhet och "trial and error". Detta har medfört stora misstag och problem. Ett exempel är att det under senare år skett en omfattande och oacceptabel sprickbildning i denna typ av fasader. Eftersom man inte kan förklara sprickbildningen på en vetenskaplig grund är uppfattningarna om orsaken till sprickbildningen, och vilka åtgärder som ska vidtas när sprickbildning inträffat, högst varierande. Det arbete som presenteras här försöker peka ut de mekanismer som ligger bakom sprickbildning i puts på isolering. Arbetet är en del av ett större arbete inom samma område.

1.2 Problembeskrivning

I figur 1 visas puts på isolering. Den här typen av puts kännetecknas av ett putsskikt, 10 – 20 mm, som appliceras på isolering. Isoleringen utgörs normalt av mineralull eller cellplast. För att hålla fast putsen och förebygga sprickbildning monteras ett armeringsnät som i sin tur fästs i underlaget med kramlor.



Figur 1 Puts på isolering.

Det finns flera materialleverantörer på marknaden. Varje leverantör har utvecklat egna system, så i praktiken förekommer stora variationer på putssystemen. Putssystemens variationer kan avse binde-medlets typ, ballastens sammansättning och gradering, olika egenskapsförbättrande kemiska tillsatser, typ och placering av armering, typ av infästningsanordning samt infästningens mekaniska egenskaper. Vissa putsbruk kan även innehålla fibrer, dels för att minska brukets initialkrympning och dels för att fördela de eventuella sprickor som uppkommer.

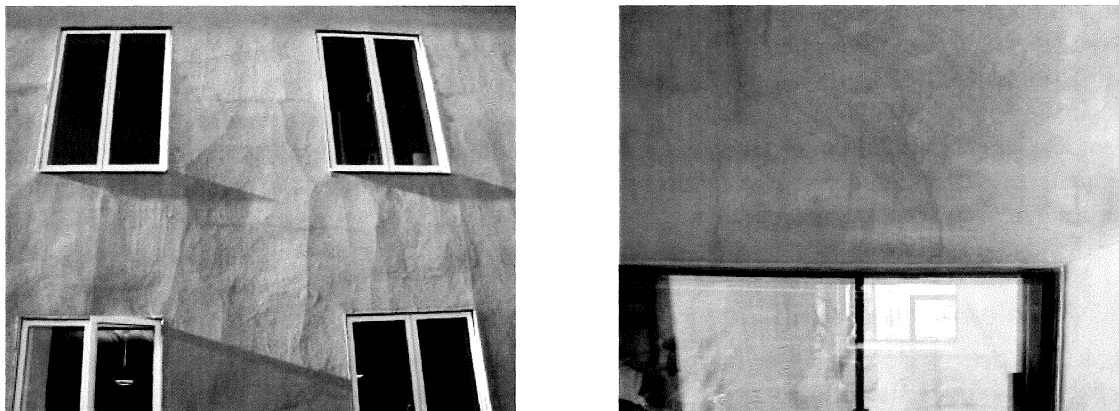
Sandin (1998) har utfört en omfattande litteraturstudie och sammanställt bl.a. den forskning som bedrivs internationellt beträffande sprickbildning i puts på isolering. Av Sandins sammanställning framgår att vissa putssystem av den typ som visas i figuren spricker. Detta är inte enbart ett svenskt problem utan även ett internationellt förekommande problem. Genom kontakter med marknads olika parter – beställare, materialleverantörer och entreprenörer – har det framkommit att sprickbildning i puts på isolering är det för närvarande allvarligaste problemet inom putsområdet. I figur 2 visas sprickbildning i puts på isolering.

Genom kontakter med parterna i putsbranschen samt en omfattande litteraturstudie (referenser ges i Sandin (1998) framkom följande faktorer som hypotesiska orsaker till sprickbildning.

1. Förhindrade fuktrörelser.
2. Ojämn fuktfördelning genom putsens tjocklek och över fasadytan.
3. Förhindrade temperaturrörelser.
4. Ojämn temperaturfördelning genom putsens tjocklek och över fasadytan.

5. Kombination av faktorerna 1-4.

Utöver de ovanstående faktorerna tillkommer ytterligare en viktig faktor som man inte har uppmärksammat speciellt mycket, nämligen sug- och tryckbelastning orsakad av vind. Denna faktor i kombination med de övriga kan leda till stora påfrestningar på putsen.



Figur 2 Sprickbildning i puts på isolering (1/2-1 år efter putsning).

De tidpunkter som anges för sprickornas uppkomst varierar mellan 1 månad och några år efter appliceringen. Ofta anses att denna spridning är systemberoende, d.v.s. olika system spricker vid olika tidpunkter. Även sprickmönstret anses vara systemberoende. Ingen ingående analys beträffande orsakerna till spridningen i tiden för sprickornas uppkomst och deras mönster finns.

Ofta anges även typen av armering och dess placering som orsak till sprickbildning. Bortsett från enstaka teoretiska studier, se Sandin (1998), finns ingen ingående undersökning rörande effekterna av armeringen.

Kunskapsläget beträffande sprickbildning i puts på isolering är för närvarande mycket bristfälligt. Man är överens om att vissa system spricker. Man kan däremot inte peka ut den riktiga orsaken/orsakerna. De teoretiska studier som är publicerade i litteraturen behandlar problemet fenomenologiskt. De är baserade på små provkroppar och modellerna är verifierade med provningar i laboratorieskala. Dessa modeller duger inte till att beskriva sprickbildningen på en putsad fasad.

1.3 Tidigare arbete inom området

Vid Avdelningen för Byggnadsmaterial har forskning inom putsområdet pågått sedan mitten av 70-talet. Sedan tre år tillbaka har forskning bedrivits inom området sprickbildning i puts på isolering. Forskningen har utförts i samarbete med näringslivet. Arbetet har inkluderat datormodellering, bestämning av materialdata för datormodellen samt experimentella studier. Det experimentella arbetet kan indelas i tre delar.

Den första delen behandlade spricktillväxt i puts orsakad av förhindrade krympning. Denna del utfördes med relativt små provkroppar, 500 x 500 mm puts-skivor, se Sandin (2002) och Hassanzadeh (2001).

I den andra delen studerades spricktillväxt i puts på experimentväggar som var placerade i laboratoriet. Väggarna var 6 m långa och 2.5 m höga. En av väggarna hade 1.2 x 1.2 m fönsteröppning, Sandin (2003 och 2004).

I den tredje delen studerades fuktrörelser hos putsstrimlor för att mäta rörelserna i putsens plan och vinkelrätt mot putsens plan. Dessa provningar utfördes för att verifiera beräkningsresultaten samt för att förklara de fenomen som observerades på experimentväggarna. Det är denna del som presenteras i denna rapport.

Vid samtliga provningar har de för sprickbildning relevanta rörelserna mätts. Beräkningsresultat och resultaten från mätningarna har jämförts. Slutsatserna från experimenten och beräkningarna har varit samstämmiga.

2 DEFORMATION HOS PUTSREMSOR

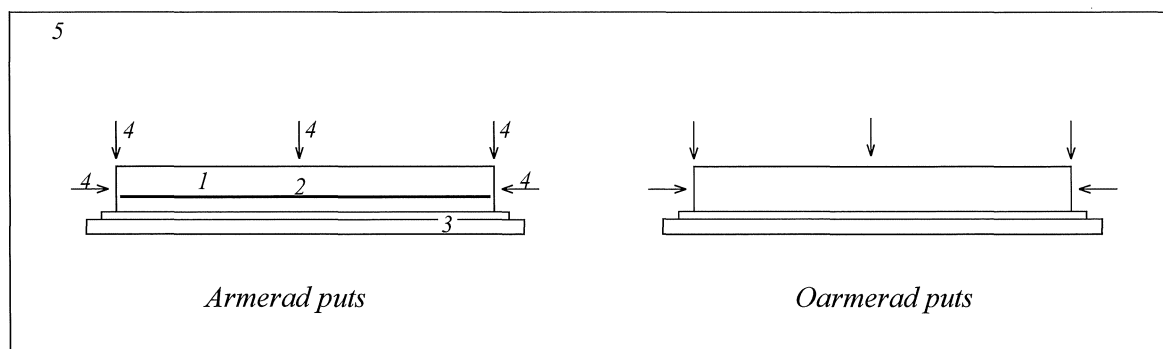
För att förstå beteendet hos puts under upprepad uppfuktning och uttorkning utsattes putsremsor för uttorkning och uppfuktning under kontrollerade förhållanden. Putsremsornas deformationer, d.v.s. den axiella deformationen samt deformationer vinkelräta mot remsans längdaxel, bestämdes under pågående uppfuktning och uttorkning.

2.1 Försöksuppställning

Försöksuppställningen framgår av figur 3. Putsremsorna göts på två lager teflonfolie som låg på en aluminiumplatta. Putsremsans längd respektive bredd var 700 mm respektive 60 mm. Putsremsans tjocklek varierades. Två tjocklekar har använts, 10 mm respektive 20 mm.

Två putsremsor göts samtidigt. Den ena var armerad med stål nät med maskvidden 20 mm och tråddiametern 1 mm. Nätet var klippt så att det bestod av två hela maskor, i mitten, och två halvmaskor utmed sidorna. Nätet placerades ca 2 mm från formens botten. Den andra putsremsan var oarmerad.

Efter gjutning skyddades remsorna mot uttorkning genom att linda 2-3 varv plastfolie runt hela formen. Remsorna härdades i laboratorieklimat, ca 20° C. Härdningstiden före uttorkningens start varierade. Härdningstiderna redovisas i samband med resultatredovisningen.



- 1 - Puts
- 2 - Armering
- 3 - Två lager teflonfolie ovanpå en aluminiumplatta
- 4 - Deformationsmätare
- 5 - Klimatbox

Figur 3 Försöksuppställning.

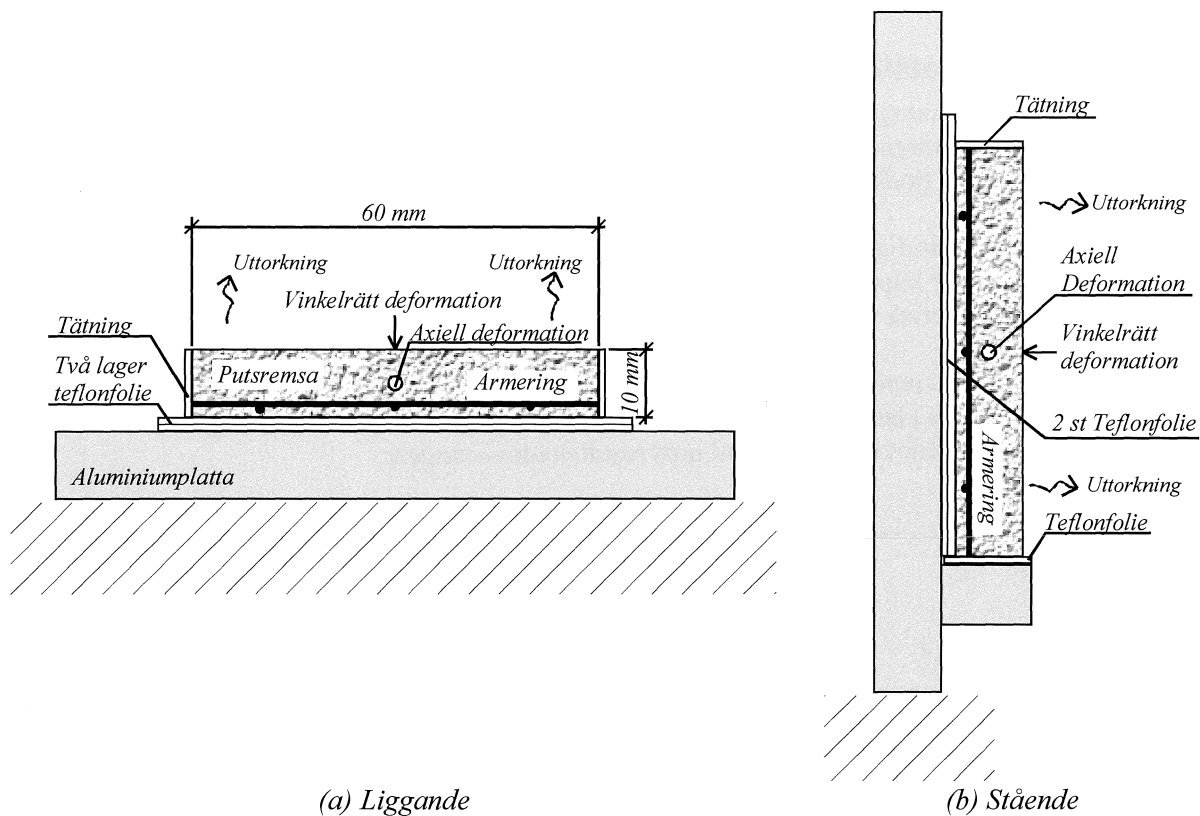
Efter härdning utsattes putsremsorna för uttorkning i en klimatbox. Boxen var placerad i en klimatkammare med relativa fuktigheten, RF, 30% och temperaturen 20° C. Boxen bestod av cellplast. Den önskade RF-nivån i boxen åstadkoms genom att placera skålar med mättade saltlösningar.

Deformationerna bestämdes kontinuerligt med hjälp av "linjär variabel givare" även kallad LVDT, Linear Variable Displacement Transducer. Både axiella deformationer och deformationer vinkelräta mot putsremsans längdaxel bestämdes.

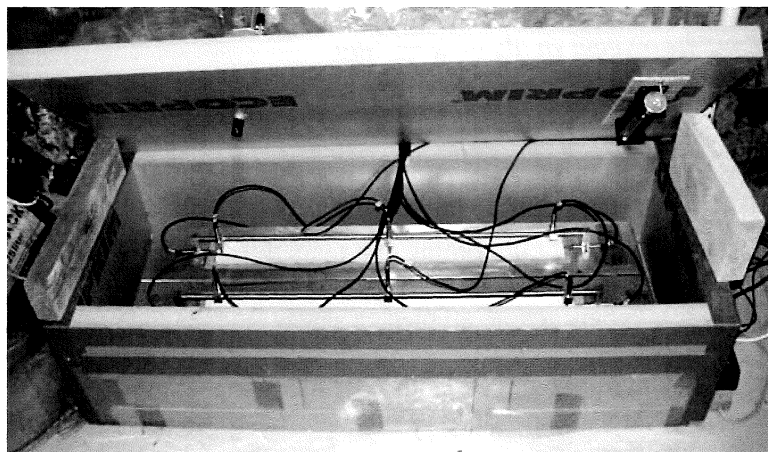
Den axiella deformationen bestämdes med två givare placerade på vardera änden av remsan. Den axiella deformationen är summan av givarnas mätvärde.

De vinkelräta deformationerna mättes med hjälp av tre givare. Två givare var placerade 15 mm från vardera änden av remsan, figur 6. Den tredje givaren var placerad på mitten av remsan.

Vid vissa provningar placerades remsorna liggande, se figur 4a och vid vissa stående på kanten, se figur 4b. Fuktutväxlingen mellan putsremsan och omgivningen skedde endimensionellt. Uttorkningsriktningen framgår av figur 4. Hantering av provkropparna var på sådant sätt att putsremsorna aldrig lyftes från aluminiumplattan och teflonfolierna förrän försöken var avslutade.



Figur 4 Försöksuppställning vid uttorkning och uppfuktning. (a) Liggande. (b) Stående.



Figur 5 Klimatbox. Putsremsor liggande på aluminiumplattor.

2.2 Putsbruk

Syftet med provningar var att studera förekomsten av vissa fenomen. Därför användes enbart en typ av putsbruk. Putsbruket var ett finputsbruk med fin ballast, SERPO 136. Det bruk som användes var detsamma som användes vid inledande försök på provväggar Sandin (2003).

Den sats som blandades vid varje gjutningstillfälle bestod av 3.5 kg torrbruk och 0.740 kg vatten.

2.3 Provningsresultat

2.3.1 Presentation av resultat

Resultaten av varje provningsomgång redovisas med en figur bestående av tre delfigurer, Xa, Xb och Xc. X är figurnummer och a, b och c är delfigurer. Delfigur a visar resultatet av den oarmerade putsremsan medan delfigur b visar resultatet av den armerade putsremsan. Delfigur c visar relativa fuktigheten, RF, och temperaturen i boxen.

I delfigurer a och b visas remsornas deformationer som funktion av tiden. Figurerna visar remsornas axiella deformationer, markerad "Axiell", respektive deformationer vinkelräta mot remsornas längdaxel - markerade "Vinkelrätt A", "Vinkelrätt Mitten" och "Vinkelrätt B". Mätpunkternas läge på remsorna samt deformationernas positiva riktningar visas i figur 6. Kantresning, δ_A och δ_B , samt resning i mitten av remsan, δ_{mitten} , visas positiva i figurerna medan krympning, δ_{axiell} , visas negativt.

I figur 6 visas även den liggande och de stående positionerna. I den liggande positionen sammanfaller Z-axeln med axeln för tyngdaccelerationen och är riktad åt den motsatta riktningen. I den stående positionen sammanfaller Y-axeln med axeln för tyngdaccelerationen och har samma riktning som denna.

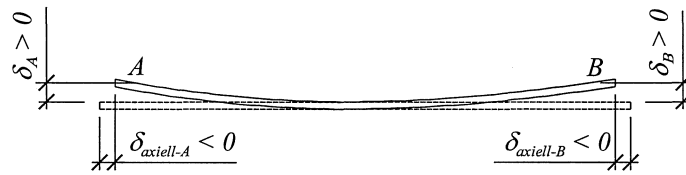
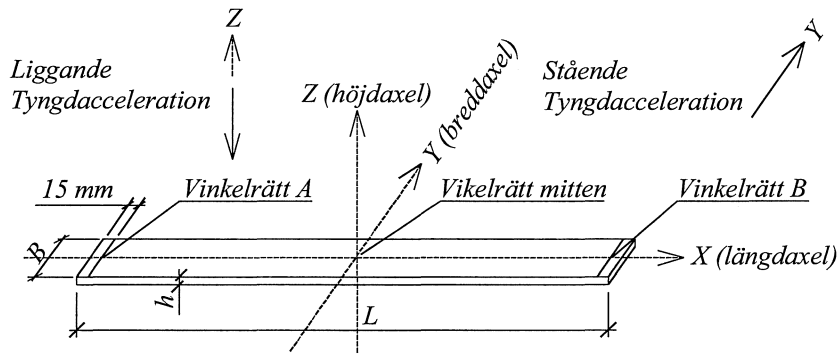
Varje provkropp har en beteckning som består av en bokstav och ett tresiffrigt nummer. Bokstaven visar provkroppens position vid provning, antingen Liggande eller Stående. Efterföljande två siffror anger remsans tjocklek i mm, antingen 10 eller 20 mm. Den tredje siffran anger nummer på provning av visst provkroppsutseende.

I figurerna syns "stora" och nästan momentana hopp i RF. Dessa beror på att provkroppen har blivit utsatt för vattenbesprutning.

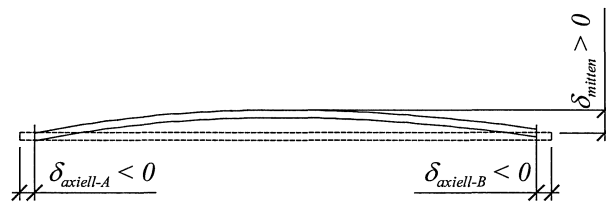
Kompletterande provningsdata framgår av tabell 1.

Tabell 1 Kompletterande provningsdata.

	L101	L102	L103	S101	S201	S102
Putsbruk [kg]	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
Vattenmängd [kg]	0.740	0.770	0.770	0.779	0.774	0.770
Längd [m]	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70
Bredd [m]	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
Tjocklek [m]	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01
Tillverkningsdatum	03-02-13	03-03-03	03-03-07	03-03-27	03-04-10	03-05-16
Start av mätning/uttorkning	03-02-14	03-03-04	03-03-17	03-04-01	03-04-17	03-05-20
Avslutningsdatum	03-02-26	03-03-12	03-03-26	03-04-14	03-05-20	
Ställning vid uttorkning	Liggande	Liggande	Liggande	Stående	Stående	Stående

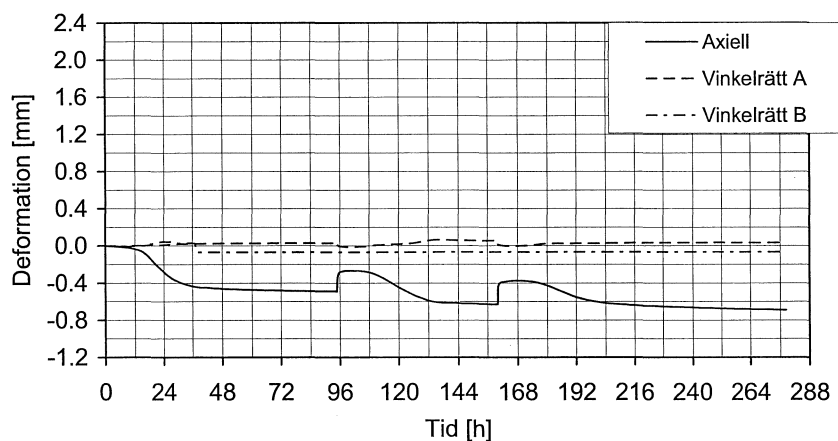


$$\delta_{axiell} = \delta_{axiell-A} + \delta_{axiell-B}$$



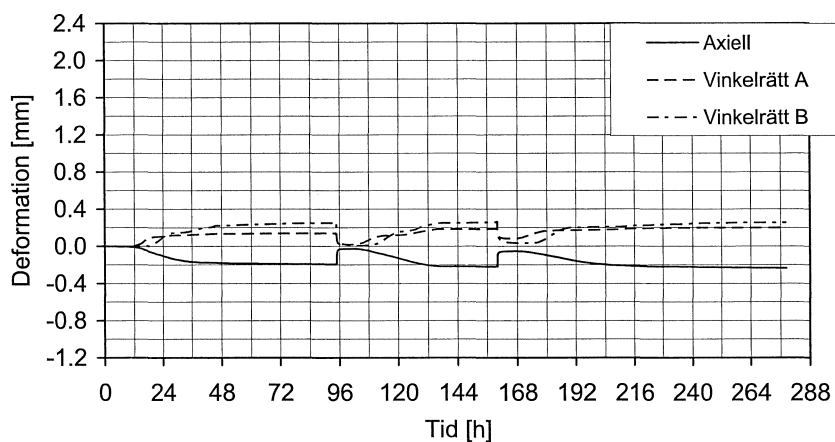
Figur 6 Mätpunkternas läge samt beskrivning deformationsriktningar.

Oarmerad putsremsa, liggande, tjocklek = 10 mm (L101)



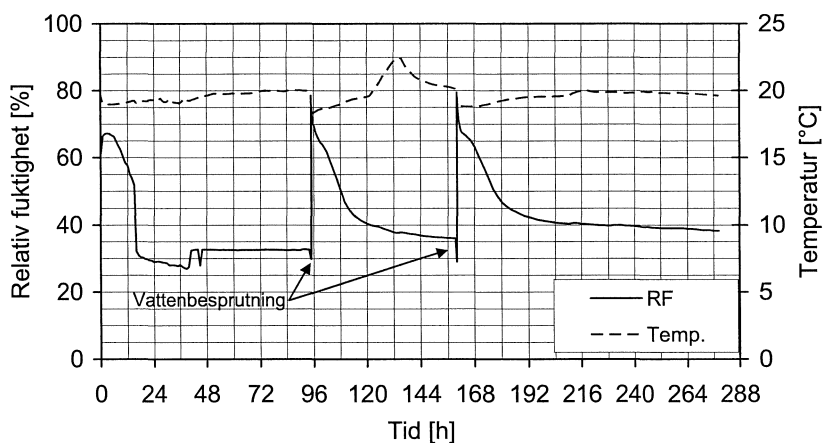
Figur 7a.

Armerad putsremsa, liggande, tjocklek = 10 mm (L101)



Figur 7b.

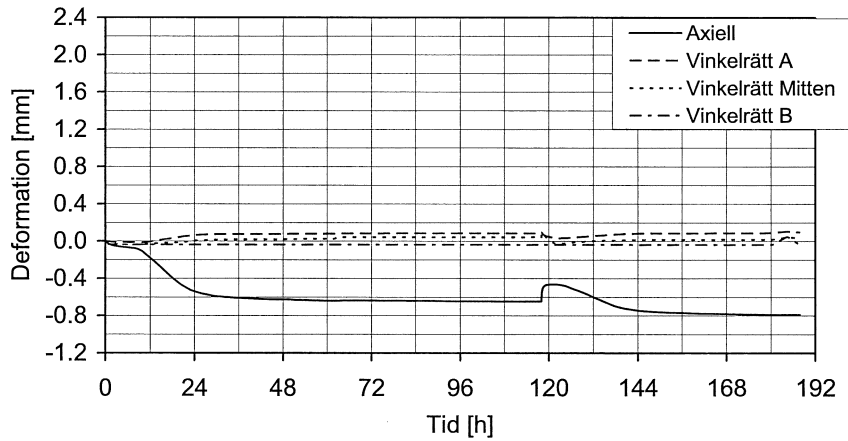
Putsremsa, liggande, tjocklek = 10 mm (L101)



Figur 7c.

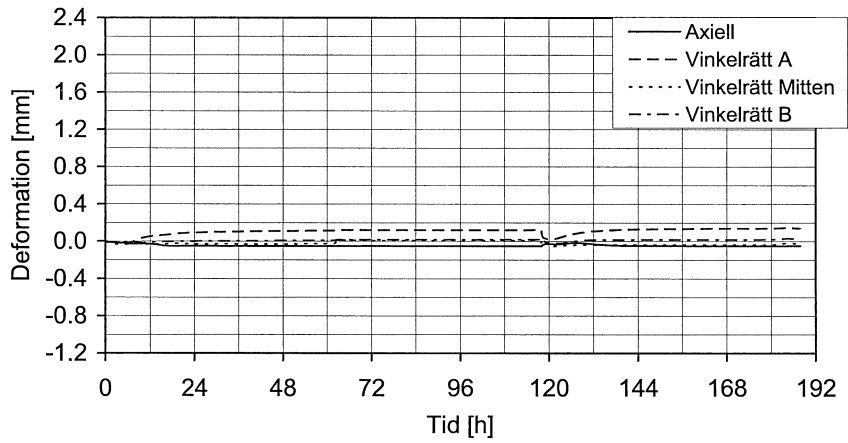
Figur 7 Deformationer hos 10 mm liggande putsremсор som funktion av tiden samt rådande RF och temperatur, L101.

Oarmerad putsremsa, tjocklek = 10 mm, liggande (L102)



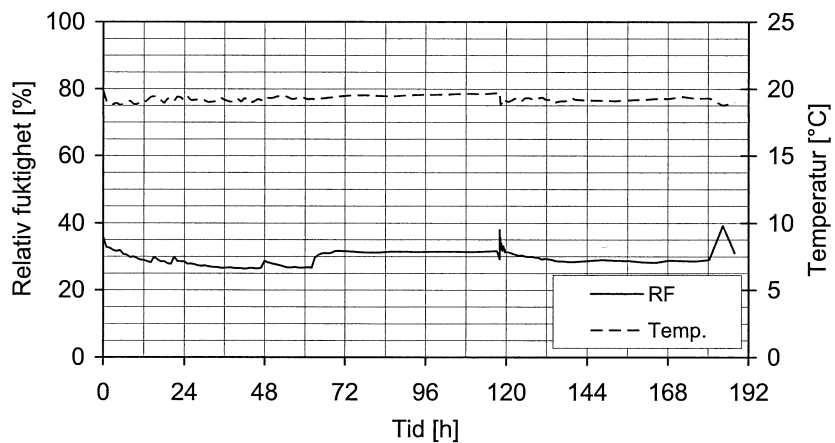
Figur 8a.

Armerad putsremsa, tjocklek = 10 mm, liggande (L102)



Figur 8b.

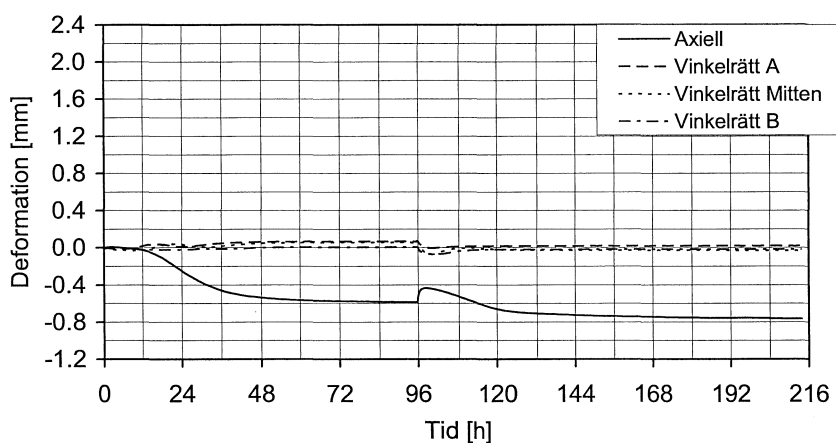
Putsremsa, tjocklek = 10 mm, liggande (L102)



Figur 8c.

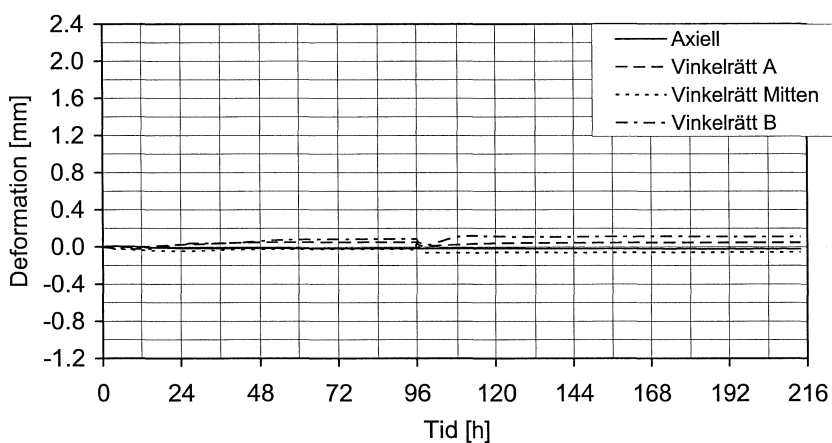
Figur 8 Deformationer hos 10 mm liggande putsremsor som funktion av tiden samt rådande RF och temperatur, L102.

Oarmerad putsremsa, liggande, tjocklek = 10 mm (L103)



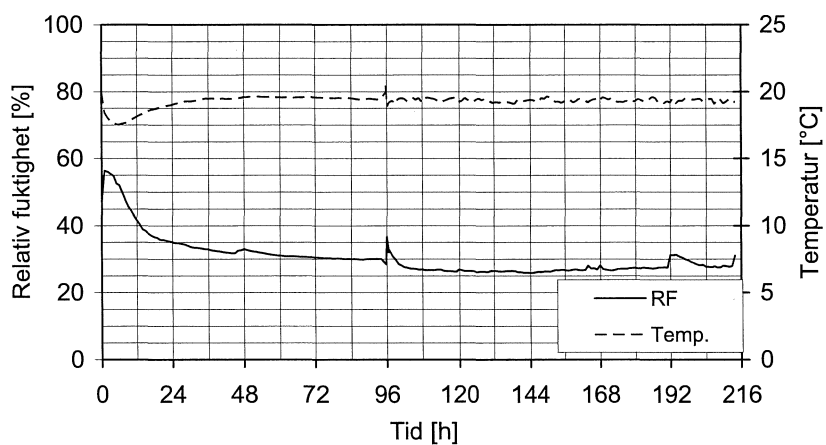
Figur 9a.

Armerad putsremsa, liggande, tjocklek = 10 mm (L103)



Figur 9b.

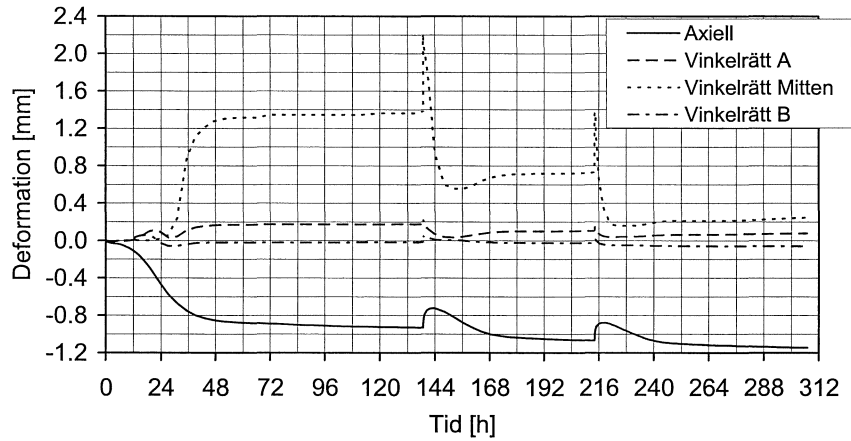
Putsremsa, liggande, tjocklek = 10 mm (L103)



Figur 9c.

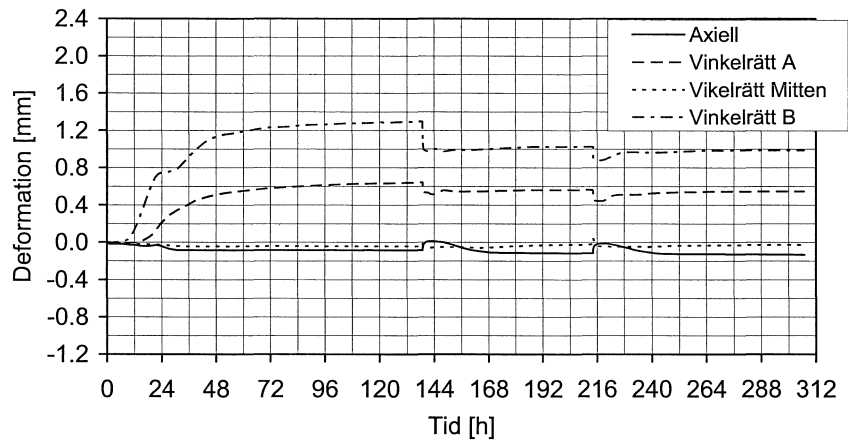
Figur 9 Deformationer hos 10 mm liggande putsremsor som funktion av tiden samt rådande RF och temperatur, L103.

Oarmerad putsremsa, stående, tjocklek = 10 mm (S101)



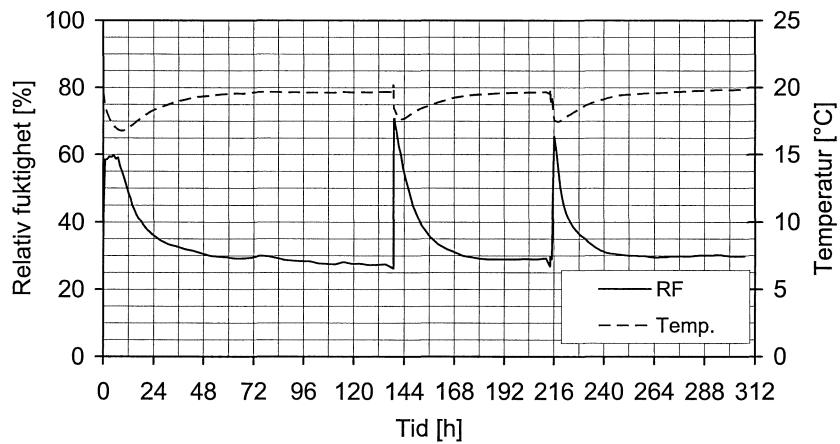
Figur 10a.

Armerad putsremsa, stående, tjocklek = 10 mm (S101)



Figur 10b.

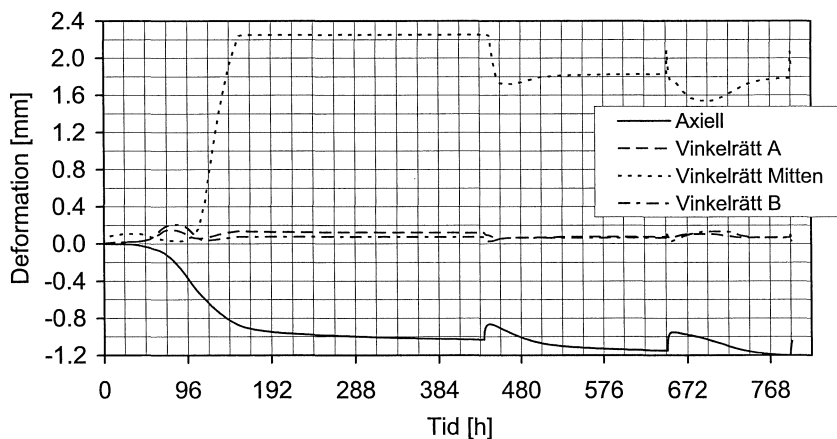
Putsremsa, stående, tjocklek = 10 mm (S101)



Figur 10c.

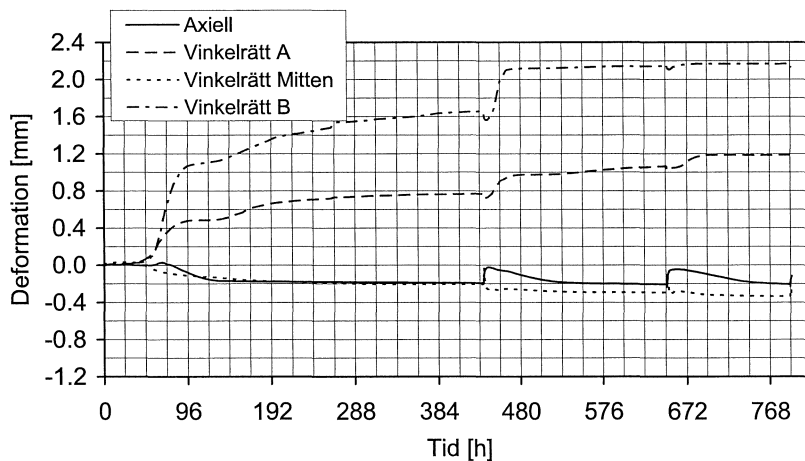
Figur 10 Deformationer hos 10 mm stående putsremsor som funktion av tiden samt rådande RF och temperatur, S101.

Oarmerad putsremsa, stående, tjocklek = 20 mm (S201)



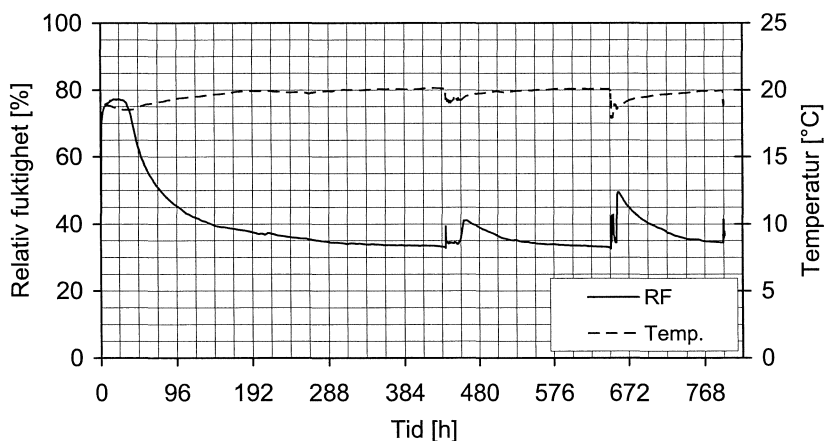
Figur 11a.

Armerad putsremsa, stående, tjocklek = 20 mm (S201)



Figur 11b.

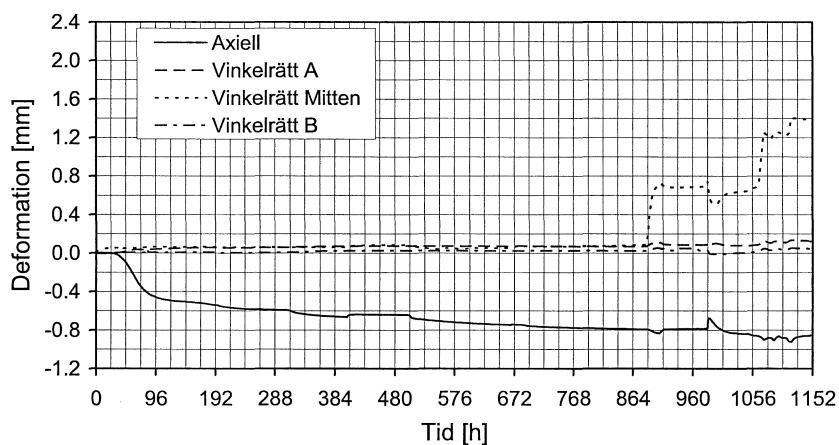
Putsremsa, stående, tjocklek = 20 mm (S201)



Figur 11c.

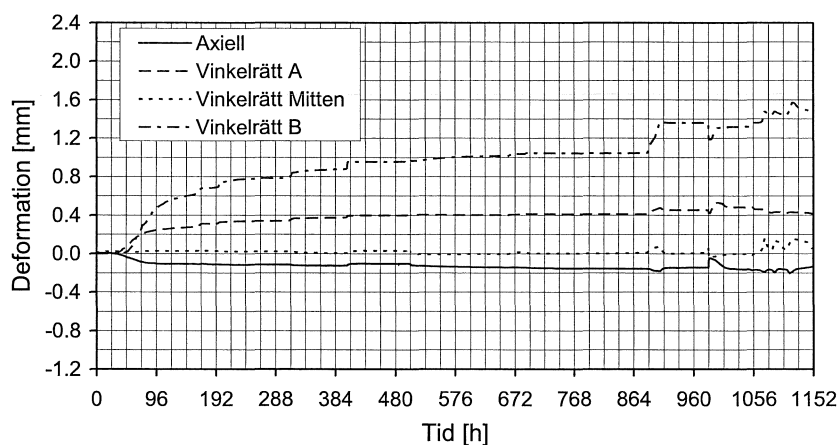
Figur 11 Deformationer hos 20 mm stående putsremsor som funktion av tiden samt rådande RF och temperatur, S201.

Oarmerad putsrensa, stående, tjocklek = 10 mm (S102)



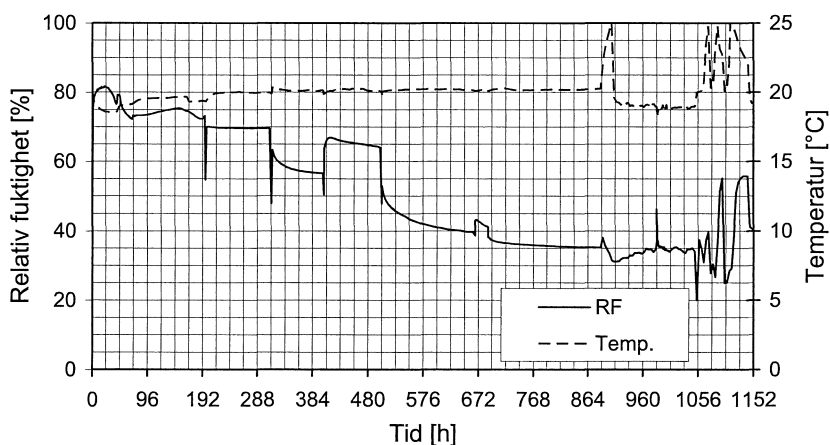
Figur 12a.

Armerad putsrensa, stående, tjocklek = 10 mm (S102)



Figur 12b.

Putsrensa, stående, tjocklek = 10 mm (S102)



Figur 12c.

Figur 12 Deformationer hos 10 mm stående putsrensor som funktion av tiden samt rådande RF och temperatur, S102.

2.3.2 Kommentar till resultaten

Resultaten är presenterade i den ordning som de är utförda. Första provningen - L101, figur 7 – utfördes utan att mäta den vinkelrätta deformationen i remsans mittpunkt, d.v.s. ”Vinkelrätt Mitten”. Som framgår av figuren krymper den oarmerade remsan axiellt men uppvisar inga vinkelrätta deformationer. Den armerade remsan uppvisar däremot både axiella och vinkelrätta deformationer. Den armerade remsans axiella deformation är betydligt mindre än den oarmerade.

Här uppstår tre frågor. Första frågan: *Varför är den armerade remsans axiella deformation mindre än den oarmerade?* Andra frågan: *Varför uppvisar den armerade putsremsan vinkelrätta deformationer?* Tredje frågan: *Varför uppvisar den oarmerade remsan inga vinkelrätta deformationer?*

Svaret på den första frågan är att armeringen motverkar putsens krympning. Detta beteende upprepas i samtliga provningar. Oberoende av remsans ställning är den armerade remsans axiella deformation mycket mindre än den oarmerade.

Svaret på den andra frågan är att armeringen motverkar putsens krympning på ena sidan vilket i sin tur utsätter remsan för en dragkraft. På grund av att armeringen är excentriskt placerad uppstår ett moment som böjer putsremsan.

Svaret på den tredje frågan ges längre fram. Faktum är att även den oarmerade remsan har vinkelrätta deformationer. Man tycker att fuktgradienten borde ge någon upplyftning av remsans ändpunkter, men så är det inte fallet. Ingen upplyftning har registrerats. Orsaken, som vi skall se senare, är att fuktgradienten ger upphov till sprickbildning samt att egenvikten motverkar putsens upplyftning, i den liggande positionen. Detta diskuteras längre fram i rapporten.

I figur 7c visas RF som funktion av tiden. Vid tiden noll placeras remsorna i boxen och locket läggs på. I boxen finns en mättad saltlösning som är i jämvikt med 33% RF. Som framgår av figuren ökar RF i boxen till en nivå som är över 65%. Orsaken är att remsorna avger fukt och det tar tid innan fukten absorberas av saltet. Efter en tid sjunker fuktigheten. För att påskynda processen lyftes locket av. På grund av att klimatkammarens RF var så lågt som 28% sjönk boxens RF till 28% vilken förklarar varför i vissa fall är RF lägre än saltets mätnads RF.

Putsremsorna tilläts torka under 96 timmar, 4 dygn, därefter besprutades de med vatten. I samband med detta ökade RF i boxen till ca 80%. Efter besprutningen tog det några dygn för RF i boxen att sjunka till låg nivå igen. Förändringarna i deformationerna framgår av figur 7a och 7b.

Den oarmerade putsremsans axiella deformation, krympning, gick tillbaka något men inte till noll. Putsremsan blev alltså inte lika långt som vid tiden noll. Orsaken är att putsremsans vattenhalt inte uppnådde samma nivå som vid tiden noll samt att en del av krympningen kan vara irreversibel. Vid efterföljande uttorkning ökade krympningen och blev större än vid tiden 96 timmar. Detta fenomen, d.v.s. krympningen ökar vid upprepade uttorkning och uppfuktning, observerades vid efterföljande provningar och har tidigare rapporterats av Sandin (2003). Krympningen ökar med upprepade uppfuktning och uttorkning men den går asymptotiskt till ett slutvärde. Deformationens tillbakagång vid varje uppfuktningstillfälle ser ut att vara konstant vilket kan bero på att den kapillärt uppsugna vattenmängden är lika stor vid samtliga uppfuktningstillfällena.

Den oarmerade putsremsans vinkelrätta deformationer påverkas inte nämnvärt av uttorkning och uppfuktning. Den vinkelrätta deformationen i mitten av putsremsan mättes inte.

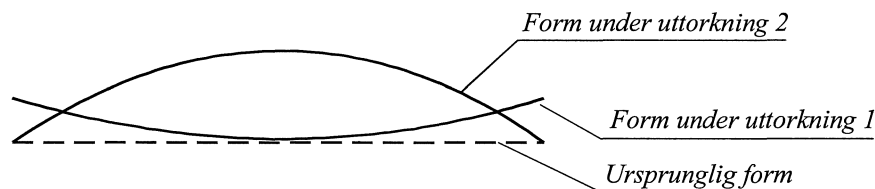
Den armerade putsremsans axiella deformation följde den oarmerade putsens men deformationernas storlek var mindre. De vinkelrätta deformationerna gick tillbaka vid uppfuktning och ökade igen vid uttorkning. Även här kan tendenser till ökade deformationer vid upprepade uttorkning och uppfuktning observeras.

För att undersöka resultatens reproducerbarhet vad det gäller de vinkelrätta deformationer utfördes en likadan provning till. Resultatet framgår av figur 8, L102. Som framgår av figuren skedde inga vinkelrätta deformationer, varken hos den oarmerade putsremsan eller den armerade putsremsan, d.v.s. att resultaten var inte reproducerbara. Ytterligare en likadan provning utfördes, L103 figur 9. Inga anmärkningsvärda vinkelrätta deformationer kunde observeras utan enbart små tendenser till vinkelrätta deformationer kunde ses. Misstänktes att egenvikten hade påverkat putsremsans vinkelrätta deformationer. Egenvikten kan motverka deformationerna och även medföra sprickbildning och försvagning av putsremsorna. För att undvika egenviktens inverkan ändrades provningsställningen. Putsremsorna placerades stående såsom visas i figur 4b. Resultaten av stående provningar framgår av figur 10-12. Som framgår av figurerna uppkom vinkelrätta deformationer hos den armerade putsremsan i samtliga fall. De vinkelrätta deformationerna i stående provkroppsställning var betydligt större än deformationerna hos provkropparna i liggande ställning vilket bevisar egenviktens inverkan.

I figur 10a visas den oarmerade putsens deformationer under ca 312 timmar. Vid tiden noll utsätts putsremsan för ensidig uttorkning. Uttorkningens riktning framgår av figur 4b vilken sammanfaller med Z-riktning som visas i figur 6. Den axiella krympningen sätter igång omedelbart. Jämförelse mellan den stående provningsställningen och de tre tidigare visar att den axiella krympningen är större vid stående position. Detta bekräftas även i den efterföljande provningen. Vid vattenbesprutning efter den första uttorkningen, tid = 135 h, går krympningen tillbaka något, sedan ökar den igen vid uttorkning. Putsremsan krymper mer än tidigare under den efterföljande uttorkning. Detta händer även vid liggande provningsställning.

Den oarmerade putsremsan uppvisar vinkelrätta deformationer, men deformationsformen är olika vid olika tider. I figur 13 visas de olika formerna. Vid tiden noll är putsremsan rak. I början av uttorkning och närvaro av fuktgradient får putsremsan en konkav deformationsform, markerad "Form under uttorkning 1". Detta bekräftas av figur 10a vid tiden ca 18 h. Som framgår av figuren handlar det om små deformationer. Efter tiden 24 h börjar putsremsan ändra form och blir konvex. De vinkelrätta deformationerna i putsremsans mitt ökar i samma takt som de axiella deformationerna. Anledningen kan vara att fuktgradienten medför att mikrosprickor bildas i putsremsan. Inga sprickor observerades under provningen. Efter avslutad provning undersöktes putsremsan med förstöringsglas. Inga sprickor upptäcktes då heller.

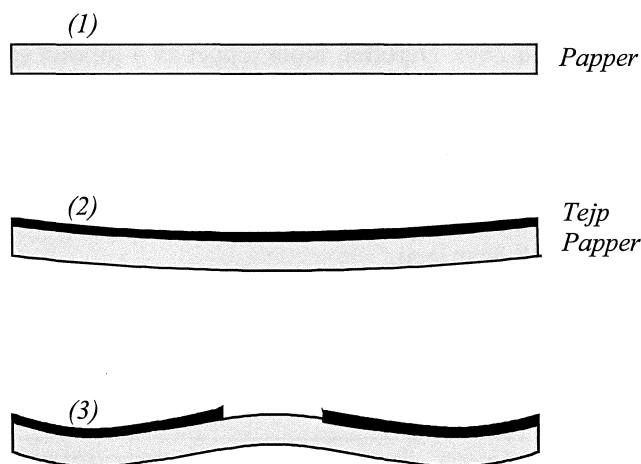
Mycket försiktigt och utan att lyfta placerades putsremsan i liggande position på aluminiumplattan. Därefter greps tag i putsremsans mittpunkt och lyftes något utan att den förlorade kontakt med aluminiumplattan. Putsremsan kändes något eftergivlig och mjuk. Putsremsan vändes 180° och lyftes på samma sätt som ovan. Den kändes då styvare jämfört med tidigare position vid upplyftning. Det här provningssättet är inte vetenskapligt men visar ändå att något har hänt och putsremsorna bör undersökas med noggrannare metoder.



Figur 13 Olika form hos oarmerad putsremsa under uttorkning.

Sprickbildningen som orsak för den konvexa deformationen kan belysas med följande experiment, se figur 14. Lägga en pappersremsa (1) på bordet. Ta en lika lång tejprensma och fäst på pappersremsan samtidigt som tejen dras hårt (2). Upprepa samma procedur med två tejprensor (3). Pappersremsan och tejprensorna uppvisar en uppböjning enligt figur 14 (3). Den borttagna tejen representerar de delar som kan ha blivit skadade. I (2) är hela tejen dragen och vill trycka ihop papperets översta skikt.

Densamma gäller för det översta skiktet av putsremsan som visas i figur 13 (form 1). Det vill dra ihop sig, därför trycker det underliggande skiktet. Resultatet blir en konkav form såsom framgår av figur 13 och 14. När tejen tas bort eller översta skiktet hos en putsremsa skadas försvinner den tryckande kraften. Pappersremsan och putsremsan vill nu fungera som "två remsor" som vill ha en konkav form. Detta är inte möjligt eftersom de är fortfarande sammanbundna. Därför den form som visas i figur 14 (3) uppstår.



Figur 14 Olika deformationsformer för pappersremsa och tejp.

Putsremsan vattenbesprutades vid tiden 135 h. Den vinkelrätta deformationen i putsremsans mittpunkt ökade ytterligare. Därefter minskade den under uttorkning och dess värde blev mindre än det värde som den hade före vattenbesprutning. Samma fenomen upprepades vid efterföljande vattenbesprutning. Att den vinkelrätta deformationen vid putsremsans mittpunkt ökar vid vattenbesprutning var förväntat, men varför dess värde minskar med upprepade vattenbesprutning är oklart. Det kan bero på mikrosprickbildning eller annat. Detta måste undersökas med noggrannare metoder.

Den armerade putsremsan, figur 10b, uppvisar liten axiell deformation vilken tyder på att armeringen motverkar krympningen. De vinkelrätta deformationerna vid A och B är relativt stora. Den vinkelrätta deformationen i putsremsans mittpunkt är obetydlig. Vid tiden 24 h syns en liten förändring i kurvorna A och B, mer synlig hos B. Förändringen kan bero på att den armerade putsremsan vill bete sig på samma sätt som den oarmerade men blir förhindrad av armeringen. Efter avslutad provning noterades två sprickor på den armerade putsremsan. Sprickorna befann sig ca 20 cm från remsans ändar.

I figur 11 visas resultatet av provningar utförda med 20 mm putsremsor. Denna putsremsa beter sig nästan på samma sätt som 10 mm putsremsa. Skillnaderna är att det tar längre tid för den tjockare putsremsan att torka ut samt att de vinkelrätta deformationerna är något större hos den tjockare putsremsan. Deformationen vid den oarmerade balkens mittpunkt översteg givarens mätområde, därför kunde deformationer större än 2.25 mm inte noteras, se figur 11a. Alltså är den vinkelrätta deformationen i putsremsans mittpunkt större än vad figur 11a visar.

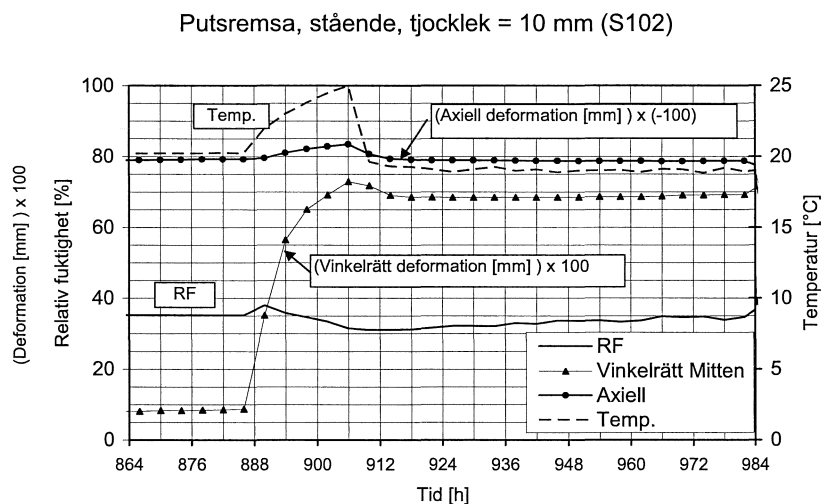
Den armerade 20 mm putsremsans axiella deformation är större än 10 mm putsremsans trots att de axiella deformationerna hos den oarmerade är ungefär lika stora. Detta beror på att armeringsandelen hos den tjockare putsremsan är lägre än den tunnare. I den tjockare putsremsan orkar putsen att trycka ihop armeringen mer.

Den sista provningen, S102, visas i figur 12. Putsremsans tjocklek var 10 mm. Avsikten med denna provning var att torka remsan långsamt för att minska fuktgradientens inverkan. Putsremsorna torkades långsamt till jämvikt med 35% RF. RF i boxen sänktes långsamt genom att successivt byta ett salt

mot ett annat med lägre jämvikts RF. Hela förloppet tog ca 880 h, 37 dygn. Under denna tid noterades inga vinkelräta deformationer hos den oarmerade putsremsan. Vid den snabba uttorkningen enligt tidigare uppkom "stora" vinkelräta deformationer i den oarmerade putsens mittpunkt, men inte i detta fall. Den armerade putsremsan, däremot, uppvisade vinkelräta deformationer vid ändpunkterna A och B. Deformationerna i denna provning, S102, var lika stora som fallet med snabb uttorkning, S101.

Efter 886 h lyftes boxens lock så att boxen var halv öppet. Avsikten var att putsremsorna skulle komma i jämvikt med klimatkammarens klimat och därefter vattenbesprutas. Olyckligtvis fungerade inte klimatkammarens reglersystem som det skulle. Under 18 timmar steg temperaturen från 20° C till 27° C grader och RF sjönk från 38% till 26%. Därefter, inom loppet av 4 timmar sjönk temperaturen från 27° C till 20° C och RF ökade från 26% till 33%.

Figur 15 är en förstoring av figur 12a (deformationer hos oarmerad putsremsa) och 12c (Temperatur och relativ fuktighet). I figuren visas RF- och temperaturförändringarna mellan tiden 864 h och 984 h. Som framgår av figuren ökar temperaturen från 20° C till 25° C och därefter sjunker den. RF stiger till 38% och sjunker sedan till 30% och ökar igen.



Figur 15 RF-, temperatur- och deformationsändring hos oarmerad putsremsa p.g.a. driftstörning.

Driftstörningen skadade provkropparna. Effekterna framgår av figur 12a och 12b, d.v.s. ökad utböjning utan någon större förändring av RF. Orsaken är förmodligen temperaturökningen vilken förklaras nedan.

I figur 15 har kurvorna för den oarmerade putsremsans mittpunktsdeformation, Vinkelrätt Mitten, och axiell deformation ritats. Deformationerna har multiplicerats med 100 (vinkelrätt) respektive -100 (axiell) för att passa in i RF-axelns skala. I denna figur är krympning positiv. Som framgår av figuren följer både den vinkelräta och den axiella deformationen temperaturkurvan. Ökad temperatur ger ökad axiell och vinkelrätt deformation vilken möjligen kan förklaras med följande hypotes. Vid ökad temperatur avger gelporer, mycket fina porer 1 – 7 nm, fukt till kapillärporer, 0.1 – 100 µm, Helmuth (1961). Vid höga RF medför detta en expansion i materialet eftersom expansionen av det vatten som finns kvar i gelen är större än den kontraktion som orsakas av att en del vatten lämnar gelporena. Helmuths undersökning gällde för fuktiga cementprovkroppar. I detta fall är provkroppen så torr att det kan vara möjligt att expansionen av det vatten som blir kvar är mindre än den kontraktion som orsakas av att vattnet lämnar gelporena.

Putsremsorna, S102, vattenbesprutades vid tiden 984. Jämför figur 10a med 12a. I den senare figuren saknas den snabbt ökande och snabbt avtagande deformationen som syns i figur 10a. Det är svårt att

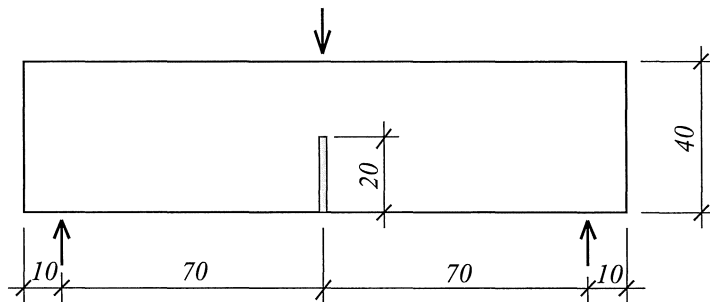
ange orsaken till detta. En möjlig hypotes är att S101 kan vara mer skadad än S102 vid vattenbesprutningstillfället.

När provkropparna utsattes för klimatförändringarna i kammaren uppstod stora och ”snabba” temperatur- och fuktväxlingar, vilka medförde stora deformationsökningar hos både oarmerade och armerade putsremсор. Detta visar att temperatur- och fuktväxlingar, trots relativt liten amplitud, kan medföra stora skador hos putsen. Detta bör beaktas vid framtida provningar av putsremсор och putsade väggar i stor skala. T. ex. kan temperaturökning på grund av solsken medföra samma typ av skador som beskrevs ovan.

2.3.3 Brottmekaniska egenskaper

Brottmekaniska provningar - d.v.s. bestämning av hållfasthet, elasticitetsmodul, brottenergi m.m. – utfördes inte i samband med provningar av putsremсор. Däremot bestämdes vissa av de brottmekaniska egenskaperna i samband med provning av provväggar, Sandin (2003 och 2004). För putsremсорna användes samma bruk som användes i den första provväggen. Då bestämdes brukets böjdraghållfasthet och brottenergi 4, 7 och 50 dygn efter gjutning.

Böjdraghållfasthet och brottenergi bestämdes genom trepunktsböjprov med 160 mm x 40 mm x 10 mm provkroppar, figur 16. Upplagslängden var 140 mm. De provkroppar som användes för bestämning av brottenergi hade en 20 mm, halva höjden, skåra såsom framgår av figur 16. Skåran gjordes genom att placera en bit papp i samband med gjutning av provkropparna. Bestämning av brottenergi beskrivs i Hassanzadeh (2001). De provkroppar som användes för bestämning av böjdraghållfasthet hade ingen skåra.



Figur 16 Provningsställning för bestämning av böjdraghållfasthet och brottenergi.

Böjdraghållfastheten beräknas med följande formel:

$$f_f = \frac{3Fl}{2bh^2} \quad (1)$$

f_f	=	Böjdraghållfasthet	[N/m ²]
F	=	Brottlaster	[N]
l	=	Upplagslängd	[m]
b	=	Bredd (tjocklek)	[m]
h	=	Höjd	[m]

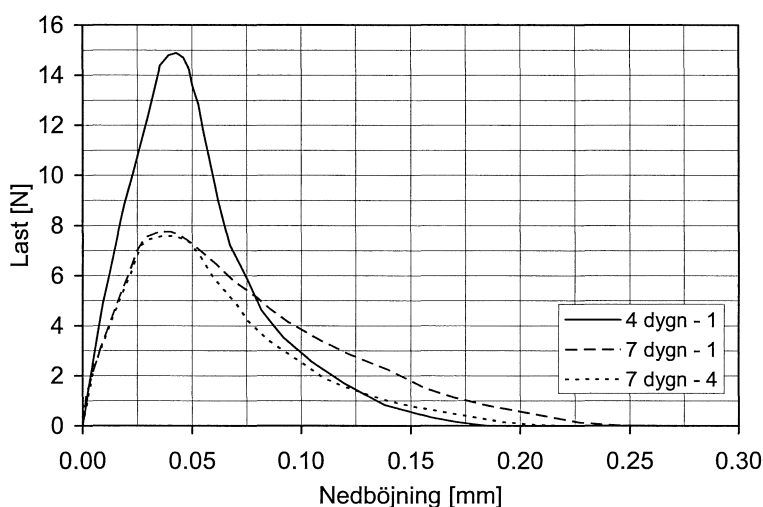
Även med hjälp av resultaten av de skårade provkropparna kan man beräkna böjdraghållfastheten. Denna kallas för nettoböjdraghållfasthet, f_{net} , och beräknas med formel 1, men h ersätts med $(h-a)$, där a är skårans djup.

I tabell 2 visas resultaten. Som framgår av tabellen är böjdraghållfastheten och nettoböjdraghållfastheten relativt låga. Två provkroppar gick sönder vid hanteringen och en tredje provkropp visar så låg böjdraghållfasthet att man kan utgå ifrån att även den var skadad. Det har varit svårt att hantera dessa provkroppar. De var mycket sköra. I tidigare avsnitt visades att putsremsor kan skadas p.g.a. fuktgradient vilket kan vara fallet även i dessa provkroppar.

I figur 17 visas last-nedböjningskurvor för de 4 och 7 dagar gamla skårade provkropparna. Normalt bör en äldre provkropp vara starkare och styvare än en yngre provkropp. Här är förhållandena det omvända vilket tyder på att provkropparna var skadade. Det är möjligt att de äldre provkropparna sprack på grund av uttorkningen. Inga synliga sprickor var dock noterade.

Tabell 2 Resultat av brottmekaniska provningar.

Ålder [dygn]	Nummer		f_f [MN/m ²]	f_{net} [MN/m ²]	G_F [N/m]
4	1	Skårad		0.71	5.0
	2	Skårad	Sönder före provning		
	3	Icke skårad	0.77		
7	1	Skårad		0.41	5.4
	2	Skårad	Sönder före provning		
	3	Icke skårad	0.09	Även denna är skadad	
	4	Skårad		0.36	4.2
50	1	Skårad		0.73	9.0
	2	Skårad		0.73	5.0
	3	Icke skårad	0.58		



Figur 17 Last-nedböjningskurvor för 4 och 7 dygn gamla skårade provkroppar.

Det bruk som användes var finputsbruk. Liknande brottmekaniska provningar utfördes tidigare med liknande typ av bruk innehållande grövre ballastkorn avsett som grovputsbruk, se Hassanzadeh (2001). Det brukets böjdraghållfasthet vid 4 respektive 7 dygn var 2.6 respektive 2.9 MN/m². Brukets brottenergi var 16 respektive 15 N/m vid 4 respektive 7 dygn. Den stora skillnaden mellan det grova och den fina putsen kan bero på att det fina bruket krymper och spricker mer än det grova.

2.4 Teoretisk behandling av resultaten

2.4.1 Uttorkning av putsremsa

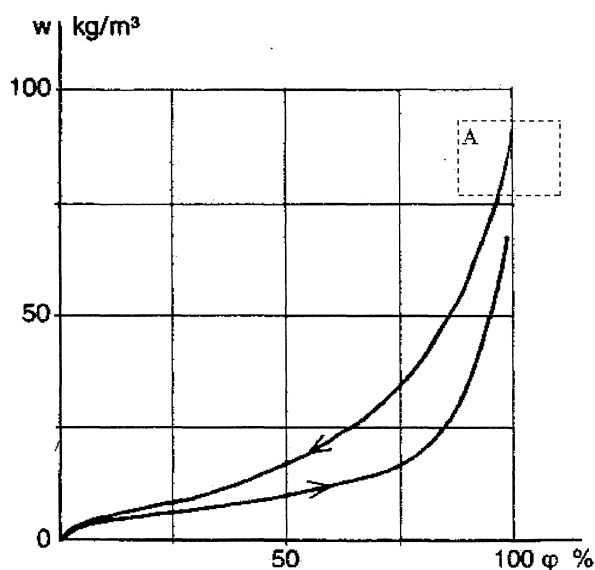
Som framgick tidigare tilläts provkroppen endast att torka åt ett håll, se figur 4, d.v.s. fukttransporten ut från provkroppen skedde i Z-riktning såsom visas i figur 6. Uttorkningsförloppet har beräknats för provkropp S101, 10 mm putsremsa och S201, 20 mm putsremsa. En numerisk beräkningsmetod har använts. Beräkningsmetoden kallas för framåtdifferensmetoden och beskrivs i avsnitt 74:3 i Nevander och Elmarsson (1994). Beräkningsmetoden använder dv/dz som potential, d.v.s. ånghaltsgradient som drivande faktor. v är ånghalt d.v.s. mängd vattenånga per volymenhet luft. z [m] är läge på Z-axeln. Beräkningsmetoden beskrivs inte här utan hänvisas till fukthandboken.

Som indata för beräkningar användes följande materialegenskaper och randvillkor:

Sorptionsisoterm

Sorptionsisotermen visar sambandet mellan den RF som provkroppen är i jämvikt med och den mängd vatten som provkroppen innehåller, figur 18. φ [%] är RF och w [kg/m³] är fukthalten. Som framgår av figuren finns skillnad mellan φ - w sambandet vid uppfuktning (nedre kurvan) och uttorkning (övre kurvan). Uttorkning har enbart beaktats vid beräkningarna. Därför har den övre kurvan använts.

Sambandet har hämtats från Nevander och Elmarsson (1994), figur 92.1c. Det gäller för kalkcementbruk 35/65/550. Vid beräkningarna antogs att putsremsan var i jämvikt med 100% RF när uttorkningen inleds. Desorptionskurvan gällde inte fram till 100% RF. Därför förlängdes kurvan genom handritning fram till 100% RF, område A i figur 18.



Figur 18 Sorptionskurva.

Ångpermeabilitet

Ångpermeabilitet δ [m²/s] är en materialparameter som styr fukttransporten i materialet. Ju större δ , desto snabbare sker transporten. δ beror både på temperatur och på materialets fukthalt. Vid beräkningar antogs att temperaturen var konstant 20° C. Följande värden användes vid beräkningar:

$\delta = 2 \cdot 10^{-6}$ m²/s, vid fukthalter motsvarande jämvikt med $\varphi \geq 70\%$

$\delta = 1 \cdot 10^{-6}$ m²/s, vid fukthalter motsvarande jämvikt med $\varphi < 70\%$

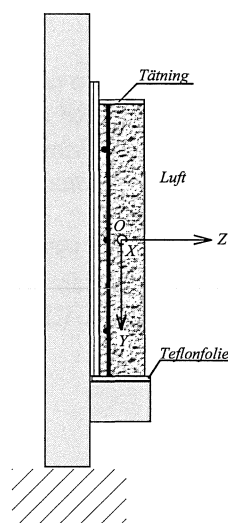
Klimat i boxen

Temperaturen har antagits vara konstant lika med 20° C.

RF i boxen har sats lika med det uppmätta värdet, se figur 10c och 11c.

Randvillkor

Beräkningarna utfördes för fukttransport i Z-riktning, figur 6 och 19. Koordinataxelns origo ligger mitt i tvärsnittet. Fuktutbyte mellan provkroppen och luften skedde enbart på ytan $z = h/2$, där h är putsremsans tjocklek. Fuktutbyte med omgivningen från de övriga ytorna var förhindrad. Fuktövergångsmotståndet från ytan $z = h/2$ antogs vara 0. Detta antagande gjordes p.g.a. den fläkt som fanns i boxen.



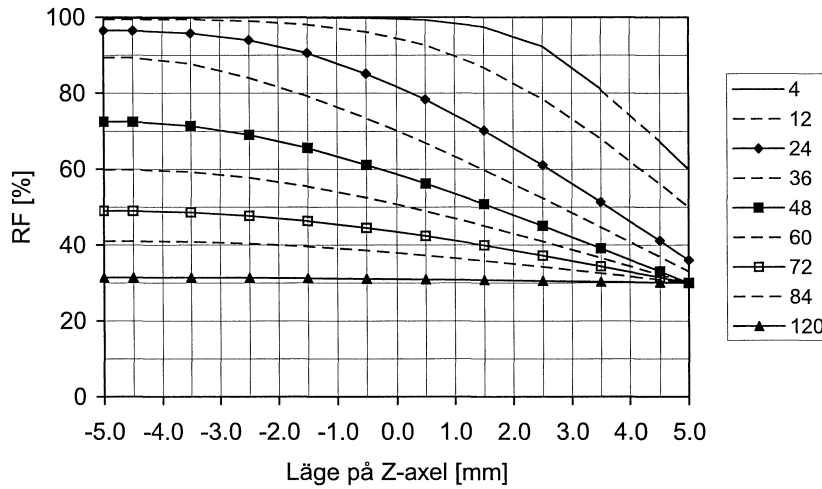
Figur 19 Koordinater för beräkning av uttorkning.

I figur 20 och 21 visas fördelningen av relativ fuktighet i putsremsorna vid olika tidpunkter. Vid tiden noll är samtliga skikt i putsremsorna i jämvikt med 100% RF. Uttorkningen medför att fukthalten förändras inne i putsremsorna. Fukthalten motsvarar en viss relativ fuktighet, RF, vilken kan bestämmas med hjälp av figur 18. Det är denna relativa fuktighet som visas i figur 20 och 21. Som framgår figurerna är RF ojämnt fördelad i början och sedan, allteftersom uttorkningen fortskrider, jämnas den ut, d.v.s. fuktgradienten försvinner. Figurerna visar att det tar ca 4 gånger längre tid för den tjockare putsremsan att torka ut jämfört med den tunnare.

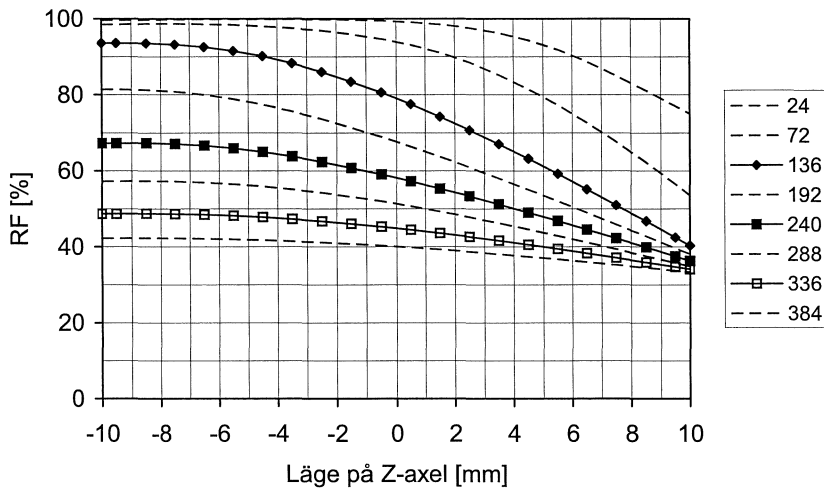
I figur 22 visas medelvärdet av RF, MRF, vid olika tidpunkter. MRF avtar med tiden. Det går snabbare för den tunnare putsremsan.

Fuktgradienten medför att krympningen blir ojämn i putsremsorna, vilket kan medföra deformationer och spänningar. Ju större fuktgradienten är, desto större blir deformationerna och spänningarna. Om spänningarna blir större än den spänning som materialet tål kan provkroppen bli skadad. I figur 22 visas även standardavvikelsen för RF vid olika tidpunkter. Standardavvikelsen kan betraktas som ett "mått" på fuktgradienten. Som framgår av figuren uppvisar standardavvikelsen ett maxvärde. Maxvärdet uppnås efter ca 24 h hos den tunnare putsremsan och efter 136 h hos den tjockare. Figur 10a visar att den oarmerade 10 mm putsremsan skadas inom 24 h. Figur 11a visar att den oarmerade 22 mm putsremsan skadas inom 96 h. Vad det gäller den tunna putsremsan stämmer den beräknade tiden väl överens med den tid som provningen anger. Överensstämmelsen är sämre vad det gäller den tjockare putsremsan. Men kurvan för den tjockare putsremsans standardavvikelse är platt vid maximum. Det betyder att skada kan uppstå när som helst inom ett brett tidsintervall.

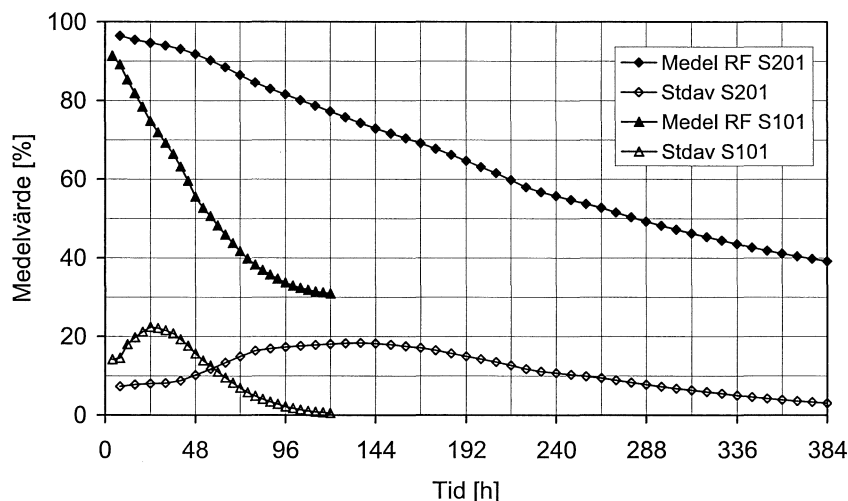
Det bör noteras att de parametrar som användes vid beräkningarna inte var uppmätta för det putsbruk som användes vid provningarna. Resultaten kan bli något annorlunda om beräkningarna görs med de parametrar som gäller för putsbruket. Resultaten indikerar ändå att det kan vara fuktgradienten som förorsakar skador på de oarmerade remsorna och att de kommer tidig d.v.s. inom loppet av ett par dygn vad det gäller den tunna remsan och 5 – 6 dygn vad det gäller den tjocka putsremsan.



Figur 20 Fördelning av relativ fuktighet i 10 mm putsremsa S101 vid olika tidpunkter.



Figur 21 Fördelning av relativ fuktighet i 20 mm putsremsa S201 vid olika tidpunkter.



Figur 22 Förändring i medel RF och RF:s standardavvikelse som funktion av tiden.

2.4.2 Samband mellan fri krympning och relativ fuktighet

Tidigare beskrevs att de oarmerade remsorna skadades under uttorkningen. Om uttorkningen sker långsamt, och utan fuktgradient, bildas inga spänningar i remsan. Däremot om uttorkningen sker snabbt bildas en fuktgradient, d.v.s. att fuktigheten varierar mellan skikten i remsan, vilket betyder att det skikt som är fuktigare vill vara längre än det skikt som är torrare. På grund av att skikten är sammanbundna utövar de tvång mot varandra. Det skikt som vill bli kortare trycker det andra och självt blir dragen. Därför är i själva verket krympningsgradienten skadeorsaken.

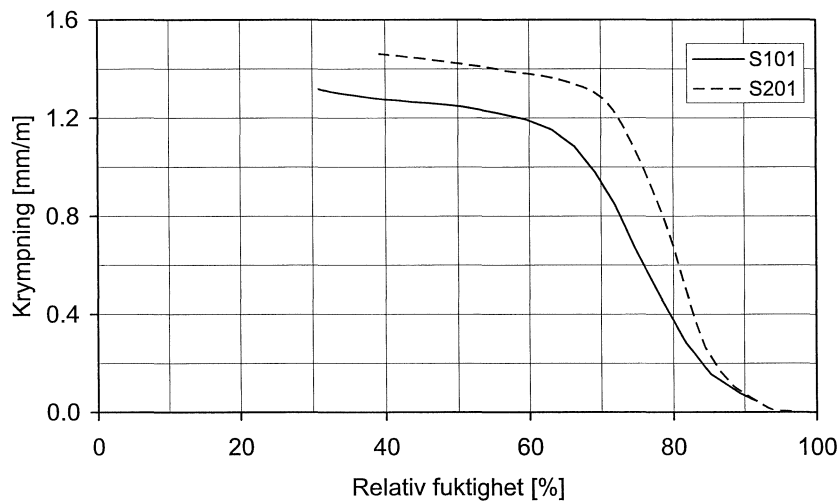
Krympningsgradienten medför att spänningar och deformationer uppstår i putsremsan. För att kunna beräkna krympningsgradienten och av den orsakade spänningar och deformationer måste fördelningen av den fria krympningen i Z-riktning vara känd. I tidigare avsnitt beräknades fördelningen av RF i putsremsan i Z-riktning. För att kunna beräkna fördelning av den fria krympningen i putsremsan krävs ett samband mellan RF och putsremsans fria krympning. Ett sådant samband har inte bestämts experimentellt, men med hjälp av data i figur 10a och 11a och fuktberäkningar i tidigare avsnitt kan ett sådant samband tas fram. Detta görs genom att anta att den beräknade medel-RF vid en viss tidpunkt är samma RF som putsremsan är i jämvikt med vid samma tidpunkt. Vidare antas att den axiella krympning som mäts vid samma tidpunkt är den fria krympning som motsvarar den beräknade medel-RF.

I figur 23 visas samband mellan medelvärdet av relativ fuktighet, MRF, och putsremsornas fria krympning. MRF är beräknad, se tidigare avsnitt, medan den fria krympningen är mätvärden, se figur 10a och 11a. Sambanden gäller för putsremsorna S101 och S201.

Figuren visar att den tjockare putsremsan krymper mer än den tunnare vilken även framgår av figur 10a och 11a. Figuren visar dessutom att krympningshastigheten, krympning/(RF enhet) är störst inom RF-intervallet 70% - 90%. Vidare sker större delen av krympningen inom intervallet 70% - 90%.

Resultaten ovan är baserade på beräkningar som är gjorda med materialdata som inte är bestämda för det aktuella bruket. Det kan medföra vissa felaktigheter men dessa påverkar inte ovanstående slutsatser. Vid beräkningarna antogs att putsremsorna var i jämvikt med 100% RF när uttorkningen sattes igång. I själva verket innehöll putsremsorna en del fritt vatten som kunde avdunsta utan att RF sänktes i materialet. Det har inte tagits hänsyn till denna effekt. RF i boxen kan vara lägre än RF i materialet. Materialet kan innehålla fritt vatten medan boxens RF kan ändå vara lägre än 100%.

Uttorkning av den tunnare putsremsan har drivits längre. Som framgår av figuren tenderar krympningshastigheten att öka vid låga RF, vilket kan ha viss praktisk konsekvens. Till exempel kan solbelysta fasader under varma sommardagar nå låga RF nivåer.

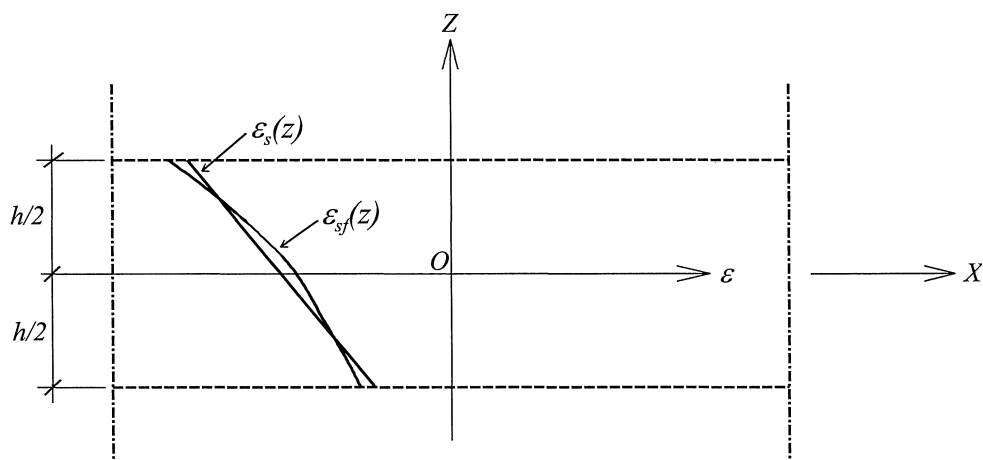


Figur 23 Samband mellan relativ fuktighet och fri krympning.

2.4.3 Spänningar och deformationer hos oarmerad putsremsa

I figur 24 visas en putsremsas X - Z plan, längd – höjd planet. Koordinataxels origo är markerad med O . Remsans tjocklek är h . Axeln ε är avsedd för töjning [m/m]. ε varierar i Z -riktning och inte i X -riktning, d.v.s. ε är en funktion av z . Töjning orsakad av krympning antas ha negativt tecken.

Om putsremsan bestod av många på varandra staplade skikt, med möjlighet att deformera oberoende av varandra, skulle krympning i varje sådant skikt vara lika stor som den fria krympningen. På grund av att fukthalten varierar i höjddled, torrast vid $z = h/2$, blir krympningsfördelningen ojämn i höjddled. Den får kanske den fördelning som visas med $\varepsilon_{sf}(z)$, fri krympning som funktion av z . I verkligheten deformeras de olika skikten inte oberoende av varandra utan det förutsätts att de påverkar varandra på ett sådant sätt att den resulterande töjningsfördelningen blir linjär såsom visas med $\varepsilon_s(z)$.



Figur 24 Putsremsans X - Z plan.

De spänningar som uppkommer beror på att töjningarna i de olika skikten måste justeras så att töjningsfördelningen blir linjär. Vissa skikt blir dragna och vissa blir tryckta. Spänningarna i X-riktning anges med följande ekvation förutsatt att materialet är linjärelastiskt.

$$\sigma_x(z) = E_p \cdot (\varepsilon_s(z) - \varepsilon_{sf}(z)) \quad \varepsilon_{sf} \leq 0 \quad (2)$$

E_p [N/m²] är putsens elasticitetsmodul.

ε_s är en linjär funktion av z och kan beskrivas med följande ekvation:

$$\varepsilon_s(z) = M_s \cdot z + N_s \quad (3)$$

M_s och N_s kan bestämmas genom att uppfylla följande villkor:

$$\int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x dz = 0 \quad (4)$$

$$\int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x z dz = 0 \quad (5)$$

Ekvation 4 är kraftjämvikt och ekvation 5 är momentjämvikt.

Med hjälp av ekvation 2 – 5 kan man bestämma M_s och N_s . Härledningen ges inte här.

$$N_s = \frac{1}{h} \int_{-h/2}^{h/2} \varepsilon_{sf} dz \quad (6)$$

$$M_s = \frac{12}{h^3} \int_{-h/2}^{h/2} \varepsilon_{sf} z dz \quad (7)$$

Beräkningarna bör utföras för olika tidpunkter tills man hittar den tidpunkt då dragspänningen i putsremsan uppnår materialets draghållfasthet. Detta har inte gjorts här utan spänningar och deformationer beräknades vid tidpunkten 136 h respektive 24 h för 20 mm putsremsan, S201, respektive 10 mm putsremsan, S101.

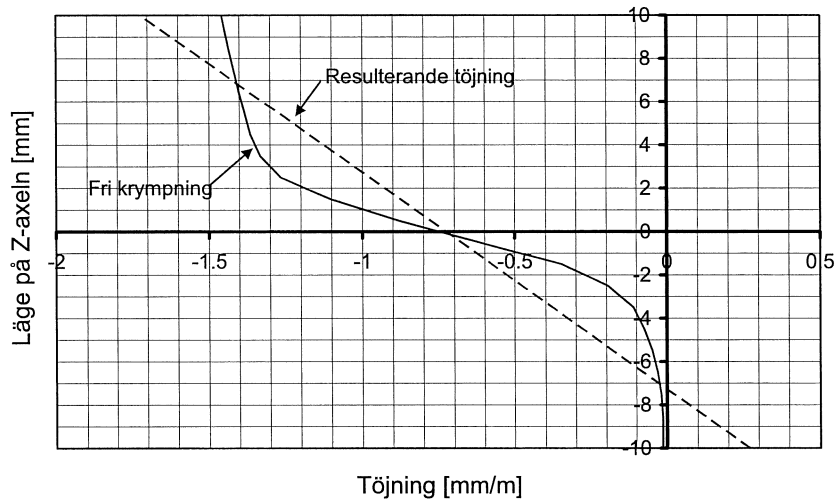
I tidigare avsnitt visades sambandet mellan fri krympning och RF samt fördelning av RF i putsremsan. Därmed kan fördelning av fri krympning bestämmas. I figur 25 och 26 visas fördelning av fri krympning i 20 mm putsremsan, S201, och 10 mm putsremsan, S101.

Med hjälp av den fria krympningen och ekvation 6 och 7 samt numerisk integrering bestäms M_s och N_s . Resultaten visas i tabell 3.

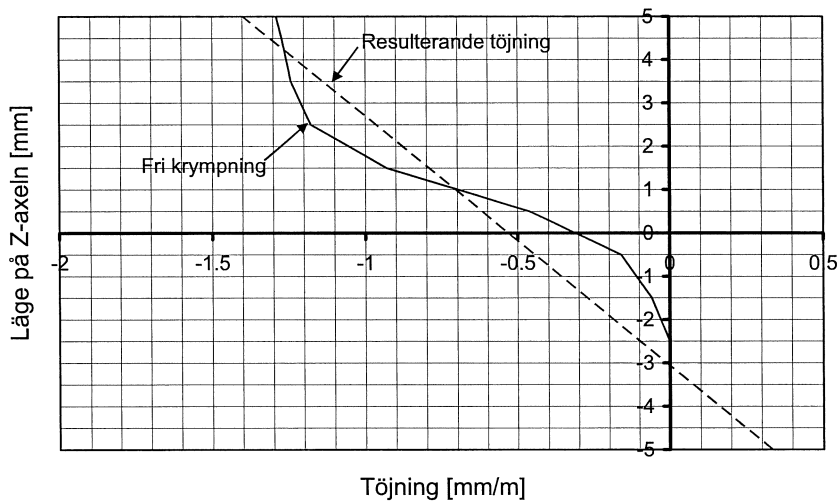
Insättning av värden i tabell 3 i ekvation 3 ger den resulterande töjningen som visas i figur 25 och 26. Spänningsfördelningen beräknas med hjälp av ekvation 2. Resultaten visas i figur 27 och 28.

Tabell 3 Resultat av integrering av ekvation 6 och 7.

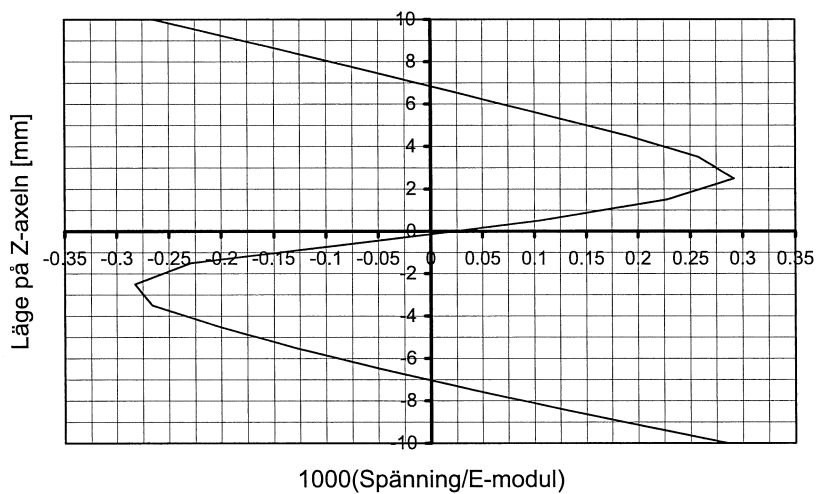
	M_s [1/m]	N_s [m/m]
S101	-0.173	$-0.531 \cdot 10^{-3}$
S201	-0.100	$-0.725 \cdot 10^{-3}$



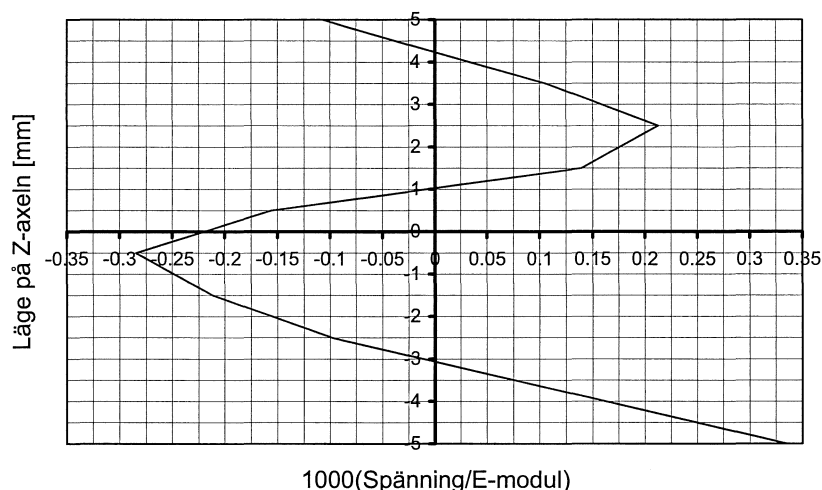
Figur 25 Fördelning av fri krympning och resulterande töjning för 20 mm putsremsa S201, efter 136 h.



Figur 26 Fördelning av fri krympning och resulterande töjning för 10 mm putsremsa S101, efter 24 h.



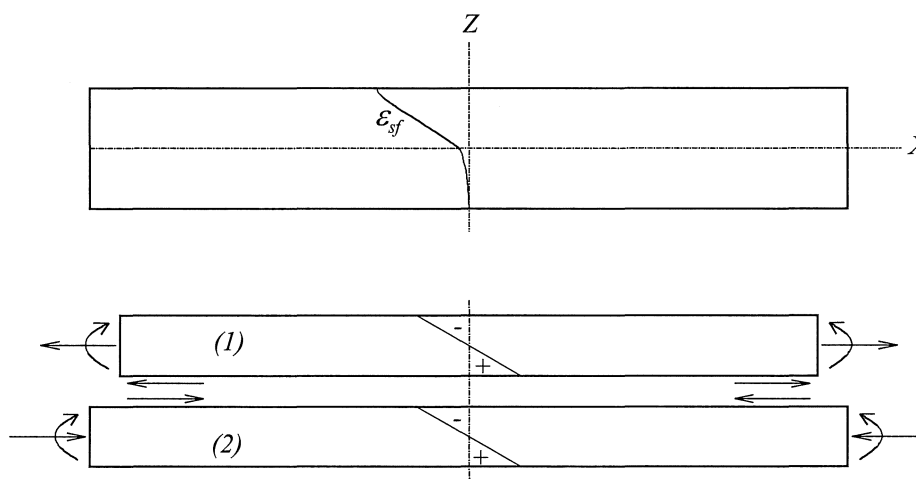
Figur 27 Fördelning av spänning i den 20 mm putsremsan, S201, efter 136 h. Dragspänning har positivt tecken.



Figur 28 Fördelning av spänning i den 10 mm putsremsan, S101, efter 24 h.
Dragspänning har positivt tecken.

Som framgår av resultaten är remsorna tryckta på den torra sidan och dragna på den fuktiga sidan. Det finns dessutom ett område med dragspänning på den övre halvan och ett område med tryckspänning på den undre halvan. Nedan belyses detta ytterligare.

Som framgår av figur 25 och 26 är den fria krympningen betydligt större i den yttre halvan, $z > 0$, av putsremsorna. I figur 29 visas en putsremsa med den fria krympningen ε_{sf} inritad. Putsremsan kan antas bestå av två skikt. Det övre skiktet vill krympa men inte det nedre. På grund av detta utsätter det nedre skiktet det övre för dragkraft vid kontaktytan mellan skikten. Det övre skiktet utsätter det nedre för tryckkraft. Krafterna ger upphov till kraft och moment med angreppspunkt på skiktens tvärsnittscentrum. Dessa krafter och moment medför att dragspänningar uppstår på nedre delen av skikt 1 och skikt 2, samt tryckspänningar på övre delen av skikt 1 och skikt 2. I figuren visas spänningsfördelningen i varje skikt. Dragspänning har positivt tecken.



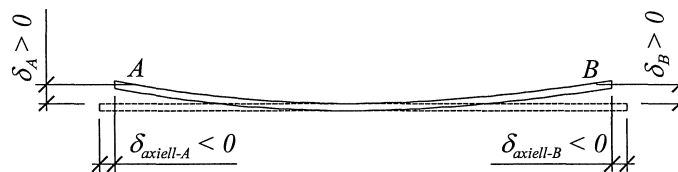
Figur 29 Uppkomst av spänningar och deras riktning i en putsremsa.

Dragspänningar i den fuktiga delen, $z < 0$, av putsremsorna är $0.34E_p/1000$ hos den tunna putsremsan, S101, och $0.29E_p/1000$ hos den tjocka putsremsan, S201. E_p är putsens elasticitetsmodul. Med $E_p = 3000$ MPa blir dragspänningarna 1.0 respektive 0.9 MPa. Spänningarna har samma storleksordning som putsens böjdraghållfasthet ca 0.8 MPa.

När putsens draghållfasthet uppnås skadas den fuktigare delen av putsremsan. Skadan är i form av osynliga mikrosprickor. Mikrosprickorna utvecklas inte till en synlig spricka eftersom skadeutvecklingen bromsas av den tryckta zon som finns över den dragna zonen, se figur 27 och 28. Inga sprickor har heller observerats i samband med provningarna. Skadan medför att dragspänningen i den fuktiga delen minskar, vilket medför en omfördelning av spänningarna. Resultatet av spänningsomfördelningen blir att tryckspänningen på den torra sidan minskar eller övergår till drag. Detta förklarar den utböjning som noterats vid provningarna.

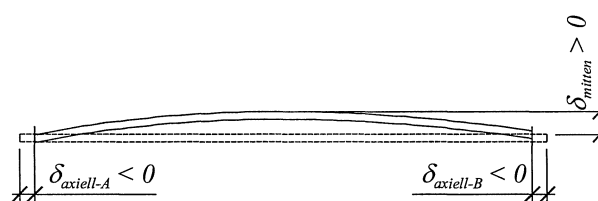
Beräkningsresultaten är starkt beroende av materialets elasticitetsmodul, fukthaltsfördelning samt sambandet mellan materialets fukthalt och krympning. Dessutom är materialets böjdraghållfasthet inte riktigt känd på grund av det uttorkningskänsliga beteendet, se avsnitt 2.3.3. Beräkningarna visar ändå att de oarmerade remsorna skadas p.g.a. uttorkningen samt att skadorna uppstår mycket tidigt.

Av figur 10a och 11a framgår att skadorna initieras tidigare än vid den tid som antogs vid beräkningarna. Putsremsorna deformeras först som remsan i figur 30a och när skadan är fullbordad övergår deformationsformen till den form som visas i figur 30b. Nedan beräknas den deformation som putsremsorna skulle uppvisa om de inte hade skadats och fortsatt att deformera såsom visas i figur 30a.



$$\delta_{axiell} = \delta_{axiell-A} + \delta_{axiell-B}$$

(a)



(b)

Figur 30 Deformationsformer; (a) före skada; (b) efter skada.

Krökningen hos remsan i figur 30a är konstant och oberoende av X. Krökningen bestäms med följande ekvation:

$$\frac{d^2 \delta}{dx^2} = \frac{1}{R} = -M_s \quad (8)$$

R är krökningsradien och M_s är lutningen hos den resulterande töjning som beskrivs med ekvation 3. $\delta(x)$, ekvation 9, kan bestämmas genom två gånger integrering av ekvation 8, samt med beaktande av följande randvillkor:

$$x = 0 \Rightarrow \frac{d\delta}{dx} = 0 \quad \text{samt} \quad x = 0 \Rightarrow \delta = 0$$

Beteckningar och riktningar är enligt figur 6.

$$\delta = -\frac{1}{2}M_s x^2 \quad (9)$$

Med $x = 0.35$ m och M_s enligt tabell 3 blir deformationerna vid punkt A och B 5.6 mm i 20 mm putsremsan samt 9.7 mm i 10 mm putsremsan. Såsom framgår av mätningarna har så stora deformationer inte uppstått i verkligheten. Skillnaden mellan de beräknade och de uppmätta värdena kan bero på att vid beräkningarna antas att materialet är oskadat och linjärelastiskt men i verkligheten kan materialet ha skadats och inte betett sig linjärelastiskt. I avsnitt 2.3.2 visades att remsorna kan skadas p.g.a. ojämn fuktfördelning.

Skadan medför att putsremsorna inte återfår sina ursprungliga former när de torkar och fuktgradienten försvinner, se figur 10a och 11a. När putsremsorna återfuktas blir spänningsbilden motsatt den som visas i figur 27 och 28. Vid uppfuktning blir den sida som vetter mot luft fuktigast och blir utsatt för dragspänning. Den motsatta sidan som tidigare var utsatt för dragspänning blir nu utsatt för tryckspänning. Här skadas remsorna ytterligare förmodligen på samma sätt som enligt avsnitt 2.3.2. Utböjningen ökar i början och minskar sedan snabbt. En del av den tidigare utböjningen försvinner. För närvarande är det svårt att ange de skador som uppstår.

2.4.4 Spänningar och deformationer hos armerad putsremsa

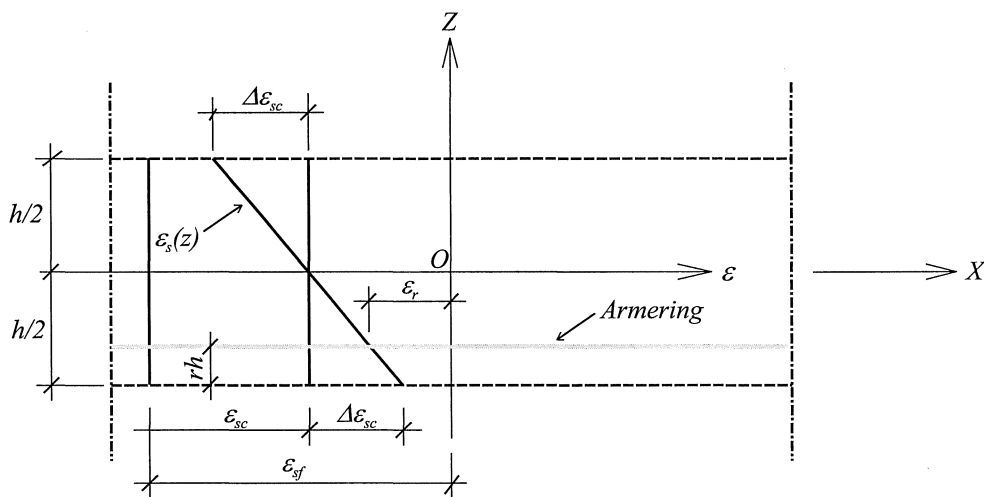
Under uttorkningsfasen uppkommer enligt tidigare avsnitt dragspänningar i putsremsans fuktigaste del. Dragspänningarna uppstår på samma ställe som armeringen befinner sig. Armeringen tar upp en del av dragspänningarna och på det sättet lindrar skadans omfattning. Vidare träder armeringen i funktion och tar upp de spänningar som annars skulle ha tagits om hand av den skadade delen. Därför fortsätter den armerade putsremsan att deformeras på det konkava sättet som visas i figur 30a. Detta beteende fortgår så länge fuktgradienten medför dragspänningar i den del där armeringen befinner sig i. När dragspänningarna försvinner på grund av fuktutjämning, och putsen vill dra ihop sig, förhindrar armeringen hopdragningen, vilken leder till att dragspänningar åter uppstår i putsen. Denna gång orsakade av armeringen och inte av fuktgradienten. Denna mekanism leder till deformationer likt den som framgår av figur 30a d.v.s. konkav form. Spänningar och deformationer orsakade av armeringen beskrivs nedan.

Armeringens motstånd mot putsens hopdragning kan vara så stor att putsen skadas. Detta framgår tydligt av figur 10 och 11. Skillnaden mellan de armerade och de oarmerade putsremsornas axiella deformationer är mycket stor, vilket visar att putsen måste ha blivit utsatt för stora spänningar.

Det är inte möjligt att inom ramen av detta projekt utföra exakta beräkningar med beaktande av de fenomen som styr spänningar, deformationer och sprickbildning i putsen. Nedan visas en överslagsberäkning för att visa effekten av vissa parametrar.

De beräkningar som redovisas nedan förutsätter att: (1) putsremsan har jämn fuktfördelning och att samtliga snitt krymper lika mycket om putsremsan vore utan armering; (2) plana ytor före krympning förblir plana efter krympning; (3) inga sprickor uppkommer; (4) det råder perfekt vidhäftning mellan armering och puts; (5) putsens krypning, tidsberoende deformationer, beaktas inte.

I figur 31 visas en del av en armerad putsremsa. Om putsen var utan armering skulle uttorkning leda till krympningen ε_{sf} . Armeringen hindrar dock en del av krympningen vilken leder till att den själv blir tryckt samtidigt som den utsätter remsan för ett tvång. På grund av att armeringen inte är centriskt placerad uppstår ett moment som leder till att putsremsan kröker sig. Den resulterande töjningen blir linjärt fördelad, $\varepsilon_s(z)$. De töjningar som leder till spänningar är differensen mellan $\varepsilon_s(z)$ och ε_{sf} . Nedan visas sambanden mellan de töjningar som visas i figur 31. Härledningen utelämnas här. Sambanden kan härledas med hjälp av Park and Paulay (1975).



Figur 31 Töjningar i en putsremsa orsakad av jämn krympning.

$\varepsilon_s(z)$ anges av följande ekvation:

$$\varepsilon_s(z) = -\frac{2\Delta\varepsilon_{sc}}{h}z + \varepsilon_{sf} + \varepsilon_{sc} \quad \varepsilon_{sf} \leq 0 \quad (10)$$

De töjningar som leder till spänningar kan beräknas med följande ekvation:

$$\varepsilon_{st} = \varepsilon_s(z) - \varepsilon_{sf} = -\frac{2\Delta\varepsilon_{sc}}{h}z + \varepsilon_{sc} \quad (11)$$

Spänningar i X-riktning blir:

$$\sigma_x(z) = \varepsilon_{st} \cdot E_p \quad (12)$$

E_p [N/m²] är putsens elasticitetsmodul.

ε_{sc} , $\Delta\varepsilon_{sc}$ samt töjning i armeringen, ε_r , kan bestämmas med följande ekvationer:

$$\varepsilon_{sc} = \frac{\varepsilon_{sf}}{3(1-2r)^2 + 1 + n} \quad (13)$$

$$\Delta\varepsilon_{sc} = 3(1-2r)\varepsilon_{sc} \quad (14)$$

$$\varepsilon_r = n\varepsilon_{sc} \quad (15)$$

$$n = \frac{E_p A_p}{E_s A_s} \quad (16)$$

r är avståndet mellan armeringens centrum till närmaste kant dividerad med putsens tjocklek, se figur 31. I ekvation 16 står E [N/m²] respektive A [m²] för elasticitetsmodul respektive tvärsnittsarea. Indexen p respektive s står för puts respektive armering.

I figur 32 och 33 visas maximum tvång som funktion av n och r . Maximum tvång är de största töjningar som påförs putsremsan p.g.a. att armeringen förhindrar putsen krympning. Det maximalt dragande tvånget uppträder i $z = -h/2$. Det maximala tryckande tvånget uppträder i $z = +h/2$. Observera att töjningarna är dividerade med den fria krympningen. Töjningarna kan omräknas till spänningar genom multiplikation dem med E_p .

I figur 34 visas töjningar i armeringen. Armeringen är tryckt. Notera att i figur 34 har tryck positivt tecken. Töjningarna kan omräknas till spänningar genom multiplikation med E_s .

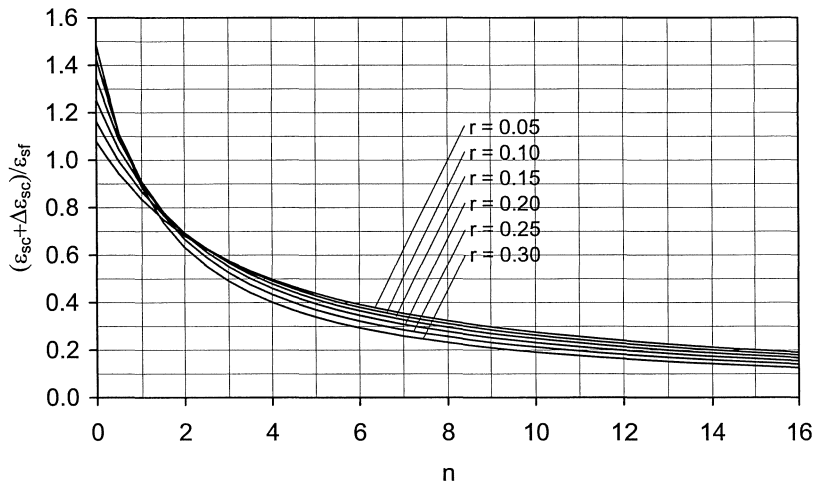
Som framgår av figurerna minskar putsens töjningar när n ökar. Detta beror på att ökad styvhet och tvärsnittsarea hos putsen medför att n ökar, vilka leder till att töjningar i putsen minskar. Även minskad armeringsstyvhet och tvärsnittsarea höjer värdet på n , som i sin tur leder till putsens töjningar minskar. Töjningar minskar med ökad r , d.v.s. ju närmare tvärsnittets tyngdpunkt armeringen är placerad desto mindre blir töjningarna. Töjningar i armeringen ökar med ökat n och r .

I tabell 4 visas n för 10 mm respektive 20 mm putsremsan..

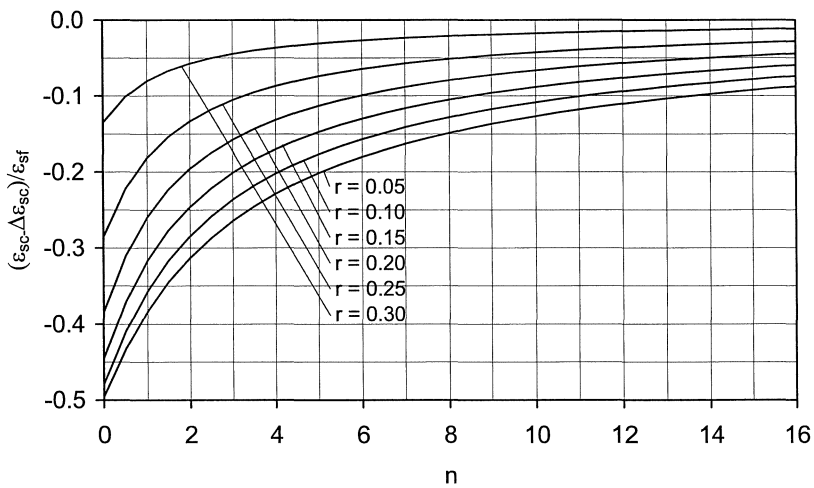
Tabell 4 n -värde för putsremsor.

	A_p [mm ²]	E_p [MPa]	A_s [mm ²]	E_s [MPa]	n
S101	600	3000	2.356	210000	3.6
S201	1200	3000	2.356	21000	7.2

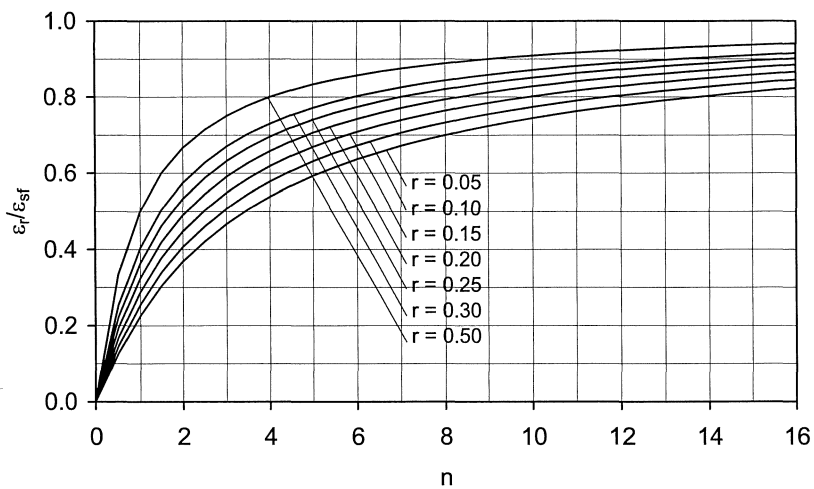
n är 3.6 för den tunnare remsan. Som framgår av figur 32 och 33 ligger detta värde nära den branta delen av kurvorna. Detta betyder lite förändringar eller fel uppskattning av de ingående parametrarna kan leda till stora förändringar i töjningar.



Figur 32 Maximum tvång, drag, i putsremsor.



Figur 33 Maximum tvång, tryck, i putsremsor.



Figur 34 Töjning i armering, tryck.

Putsremsornas utböjning vid A och B , d.v.s. δ_A och δ_B i figur 30a, kan beräknas med hjälp av ekvation 9. M_s är lutningen hos linjen enligt ekvation 10.

$$M_s = -\frac{2\Delta\varepsilon_{sc}}{h} \quad (17)$$

I tabell 5 visas maximum spänningar och deformationer i putsremsorna. Beräkningarna är utförda med samma parametervärden som visas i tabell 4, samt $r = 0.1$ för 20 mm putsremsan och $r = 0.2$ för 10 mm putsremsan. Den fria krympningen ε_{sf} sattes till 0.0013, vid tiden 120 h, för 10 mm putsremsan och 0.0015, vid tiden 384 h, för 20 mm putsremsan. Vid dessa tidpunkter var fuktgradienten borta och remsorna var genomtorra.

Tabell 5. Beräknade maximum spänningar och deformationer hos putsremsor.

	Dragspänning [MN/m ²]	Tryckspänning [MN/m ²]	Deformation [mm]
S101	0.85	0.24	2.1
S201	0.60	0.25	0.8

I figur 10b och 11b visas putsremsornas experimentellt bestämda utböjning som funktion av tiden. Vid tiden 120 h är utböjningarna 0.6 respektive 1.2 mm hos den tunnare remsan. Motsvarande värden för den tjockare remsan, vid tiden 384, är 0.8 respektive 1.6 mm. Vad det gäller 20 mm putsremsan stämmer beräkningsresultatet överens med mätningarna. Överensstämmelsen är dålig vad det gäller 10 mm putsremsan. Anledningen kan vara sprickbildning och glidning mellan armering och putsbruk.

Med hjälp av ekvation 13 och 15 kan följande ekvation härledas:

$$\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_{sf}} = \frac{n}{3(1-2r)^2 + 1 + n} \quad (18)$$

Ekvation 18 visar kvoten mellan armeringens töjning och den fria krympningen som funktion av n och r . Med förutsättningen av att armeringens töjning är lika stor som den armerade putsremsans krympning kan n beräknas med hjälp av resultaten i figur 10 och 11. I tabell 6 visas resultaten tillsammans med övrig indata för beräkningar.

Tabell 6. Värden på n beräknade med hjälp av experimentella resultat.

	Tid [h]	$\varepsilon_r/\varepsilon_{sf}$	r	n
S101	120	0.09	0.2	0.21
S201	384	0.19	0.1	0.69

Den stora skillnaden mellan n -värden i tabell 6 och tabell 4 tyder på stor glidning mellan armering och putsbruk samt sprickbildning. Även krypning, tidsberoende deformationer som inte beaktas här, kan spela en viktig roll. Sprickbildning behöver inte vara genomgående sprickor även lokala mikrosprickor kan ha stor effekt. Mikrosprickbildning kring armering kan leda till lokal glidning mellan armering och putsbruk. Mikrosprickor ökar även krypningen och medför glidning mellan armering och puts.

När putsremsan vattenbesprutas vid $z = h/2$ expanderar den övre delen vilken medför att utböjning vid A och B minskas, figur 10b tid = 138 h och figur 11b tid = 432. Minskningen är liten speciellt vad det gäller 20 mm putsremsan. Expansionen motsätts av de nedre delarna och orsakar att spänningar uppstår. Vid vattenbesprutningen blir kanten vid $z = h/2$ dragen medan den motsatta blir tryckt. Kort därefter när remsorna börjar torka blir förhållandena motsatta. Kanten vid $z = h/2$ blir tryckt medan kanten vid $z = -h/2$ blir dragen. Denna extra dragspänning läggs på de spänningar som finns kvar från tiden före vattenbesprutning. Putsremsan skadas om den sammanlagda spänningen överstiger materialets draghållfasthet. Detta framgår av figur 11b, 20 mm putsremsa, genom att utböjningen minskar lite

och kort därefter ökar. Det är ett tecken på skadebildning. Skadebildningen syns inte i figur 10b, 10 mm putsremsan är redan skadad. Som framgick ovan var risken för att bli skadad vid den första uttorkningen större hos 10 mm putsremsan än 20 mm putsremsan.

Inga beräkningar har utförts vad det gäller återuppfuktning av putsremsor.

2.5 Möjliga förhållanden vid andra experimentella förutsättningar

De redovisade provningarna gällde ett putsbruk och putsremsor med armering placerad på den sida som torkar sist. Putsremsan var fri att deformera vinkelrätt mot sin längdaxel. Experimenten bör dock upprepas med andra typer av bruk, annan placering och typ av armering samt olika typer av yttre tvång t.ex. kramlor. Man bör även utsätta remsorna för temperaturväxlingar. För närvarande är det svårt att förutsäga utgången av sådana experiment men nedan diskuteras lite kring dessa.

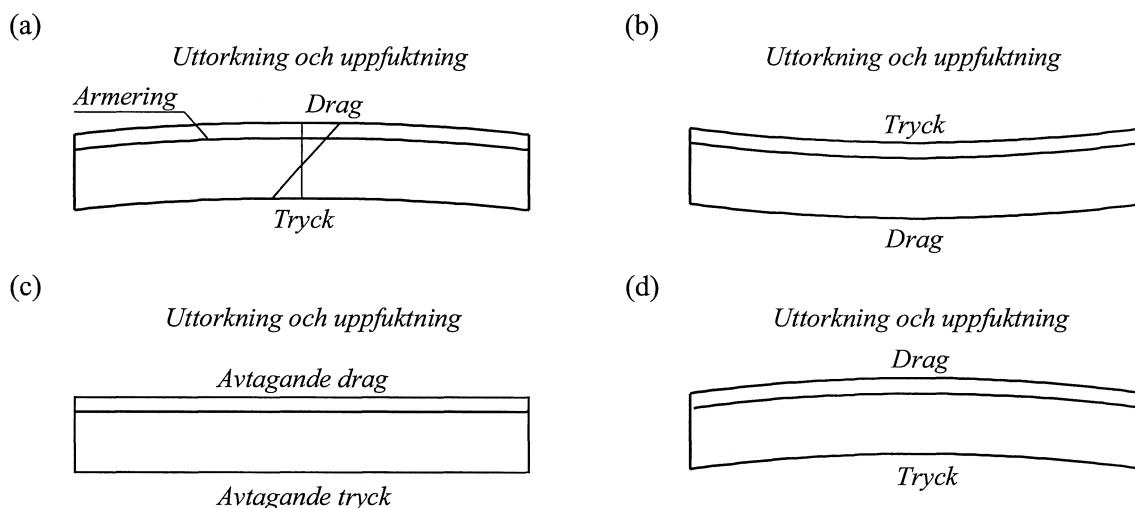
Stark puts med goda deformationsegenskaper skadas mindre. Låg styvhet hos putsen medför mindre spänningar. Däremot kan den medföra ökad utböjning som i kombination med yttre tvång, t.ex. kramlor, kan leda till sprickbildning. Man bör kanske hitta en kombination av hållfasthets- och deformationsegenskaper som ger en optimal egenskap hos putsen. Mindre krympbenäget putsbruk är alltid fördelaktigt med avseende på sprickbildning.

Som visades i figur 12 kan relativt små temperaturväxlingar medföra skador. Vad som orsakar skadorna är inte klarlagt. Temperaturväxlingar kan medföra fuktomfördelning i materialet som i sin tur kan leda till att dels krympningen ökar och dels till att det uppstår en krympningsgradient.

Om armering placeras närmast det skikt som torkas och uppfuktas först kan följande situation uppstå. I samband med första uttorkning vill det skikt som torkas dra ihop sig. Armeringen motsätter sig detta och kröker putsremsan såsom visas i figur 35a. Den torra sidan blir dragen medan den fuktiga blir tryckt. Samtidigt vill fuktgradienten kröka remsan såsom visas i figur 35b. I detta fall uppkommer tryckspänning på den torra sidan och drag på den fuktiga sidan. Den sammanlagda effekten blir större risk med avseende på sprickbildning och skador. Det är bättre än det fall då armeringen ligger på den sidan som torkas sist. När putsremsan är genomtorr blir utböjningen såsom visas i figur 35a.

När putsremsan vattenbesprutas vill den övre sidan, den fuktiga, expandera. Detta leder till att spänningarna i armeringen minskar och putsremsan vill återgå till den ursprungliga formen, figur 35c. Drag- och tryckspänningarna avtar. Samtidigt uppstår en fuktgradient som vill deformera putsremsan såsom visas i figur 35d. Detta tillstånd medför att dragspänningar uppkommer på den fuktiga sidan, där armeringen finns, och tryckspänningar på den torra. I detta fall finns armering på den fuktiga sidan som kan ta hand om dragspänningarna. Även i detta fall är det gynnsamt att ha armeringen på den sida som uppfuktas först, på ovansidan enligt figuren. När putsremsan blir genomtorr igen får remsan samma form som visas i figur 35a.

Det yttre tvång som kramlor skapar medför, vid deformationsform enligt figur 35b, dragspänning på den sida som armeringen finns. I deformationsformer som visas i figur 35a och 35c medför kramlorna dragspänningar där det inte finns någon armering. I det första fallet motverkar armeringen sprickbildningen. I det senare fallet uppkommer sprickor på undersidan. Sprickorna stannar av när de når armeringen.



Figur 35 Olika deformationsformer då armeringen är placerad närmast det skikt som uttorkas och uppfuktas.

2.6 Spricktillväxt i putsremsor utsatta för jämn krympning och tvång

2.6.1 Inledning

I detta avsnitt redovisas resultaten av numeriska simuleringar som beskriver beteendet hos armerade putsremsor utsatta för krympning. Simuleringarna utfördes före de provningar som redovisades tidigare i rapporten. Avsikten var att få en bättre kunskap om hur en armerad putsremsa beter sig när den torkas ut. Simuleringarnas resultat användes sedan för att utforma provningsmetoden som presenterades tidigare. Simuleringarna och provningarna var inte identiska vad det gäller variabler som provkroppsdimensioner, randvillkor m.m.. Ändå finns en kvalitativ överensstämmelse mellan simuleringarnas och provningarnas resultat. Simuleringarna är baserade på ungefärliga materialdata och förenklade antaganden. Därför bör simuleringens resultat betraktas som överslagmässiga. Noggrannare simuleringar bedömdes vara onödiga vid detta projekt eftersom dels grundläggande materialdata saknades och dels att avsikten enbart var en fenomenologisk studie.

2.6.2 Simuleringsförutsättningar

Den putsremsa som användes vid simuleringarna framgår av figur 36. Putsremsans dimensioner framgår av figuren. Som framgår av figuren ligger putsremsan på en elastisk bädd. Armeringen är också markerad i figuren. Tre simuleringar presenteras här. Simuleringsvariablerna har varit fasthållning vid ändpunkterna A och B, samt armeringens läge. I övrigt gäller samma förutsättningar för samtliga simuleringar. Nedan beskrivs variablerna:

Simulering 1, S1:

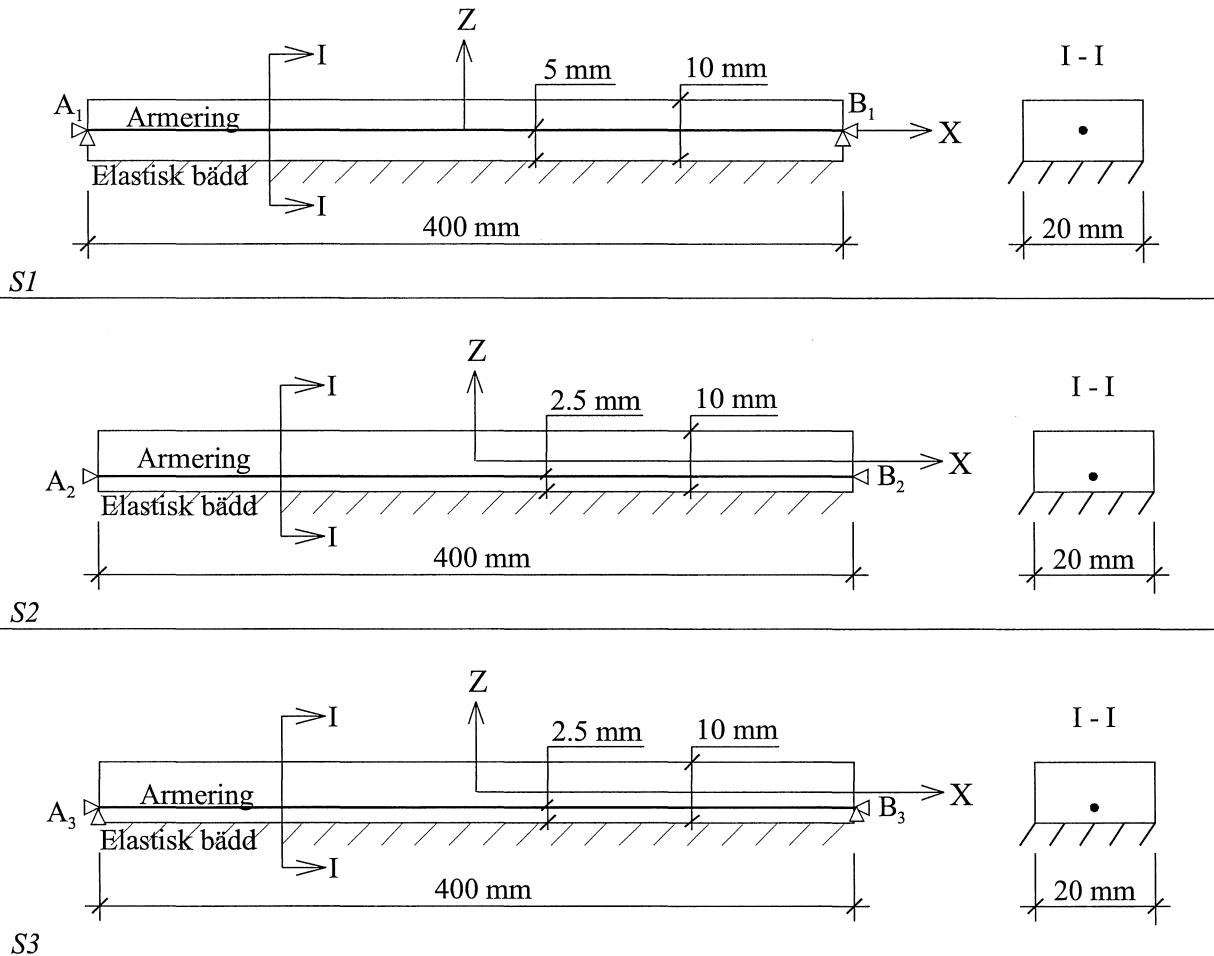
Vid denna simulering var armeringen placerad 5 mm från underkanten av remsan, $z = 0$. De horisontella rörelserna, d.v.s. rörelserna i X-led, och de vertikala rörelserna, d.v.s. rörelserna i Z-led, vid ändpunkterna A1 och B1 var förhindrade.

Simulering 2, S2:

Vid denna simulering var armeringen placerad 2.5 mm från underkanten av remsan, $z = -2.5$ mm. De horisontella rörelserna, d.v.s. rörelserna i X-led, vid ändpunkterna A2 och B2 var förhindrade. Remsan kunde fritt röra sig i vertikal riktning, d.v.s. i Z-led.

Simulering 3, S3:

Vid denna simulering var armeringen också placerad 2.5 mm från underkanten av remsan, $z = -2.5$ mm. Både de horisontella och vertikala rörelserna vid ändpunkterna A3 och B3 var förhindrade.



Figur 36 Putsremsa använd vid simulering.

Elastisk bädd

Den elastiska bädden simulerar effekterna av isoleringen bakom putsen. Den materialegenskap som beskriver bäddens beteende är bäddmodulen, K , [N/mm^3]. Bäddmodulen definieras som den kraft per ytenhet som krävs för att trycka ihop bädden 1 längdenhet. Bäddmodul sattes lika med $0.25 \cdot 10^{-3} \text{ N}/\text{mm}^3$ i samtliga simuleringar. Bäddmodulen motsvarar 50 mm bädd med elasticitetsmodulen (kompressionsmodul) $0.0125 \text{ N}/\text{mm}^2$.

Kontakt mellan putsremsa och elastisk bädd

Kontakten mellan putsen och den elastiska bädden modellerades så att tryck- och skjuvspänningar kunde överföras när putsremsan trycktes mot bädden, medan inga spänningar kunde överföras då putsen drogs ifrån bädden.

Armering

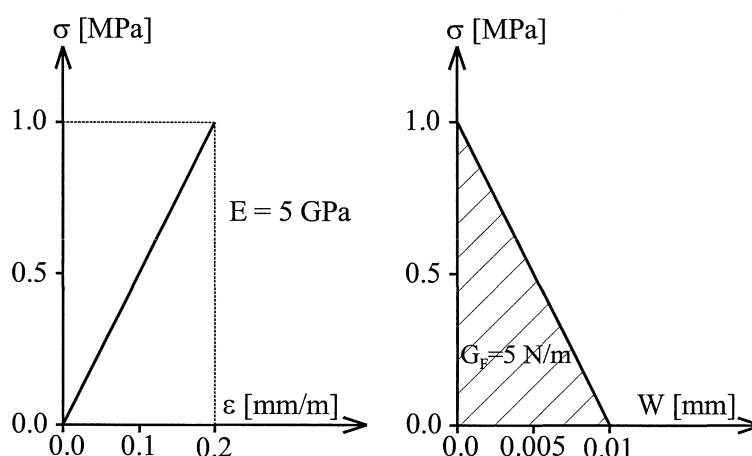
Det armeringsnät som används för putsystemen är gjort av stål. Nätets maskvidd är 20 mm. Simuleringar som presenteras här är utförda för putsremsor med bredden 20 mm, d.v.s. en armeringstråd per remsa. Armeringens diameter var 1 mm. Det förutsattes att spänningarna i tråden inte överstiger trådmaterialets sträckgräns. Stålets elasticitetsmodul, E_s , sattes till 200 GPa.

Putsbruk

Putsbruket modellerades som ett linjärelastiskt material så länge töjningen i materialet var lägre än gränstöjningen, ε_g . Därefter antogs att materialet mjuknar successivt vid ökande töjningar. Modellen beskrivs i Hassanzadeh (2001). De indata som användes är:

Draghållfasthet, f_t	= 1.0 MPa
Elasticitetsmodul, E_p	= 5 GPa
gränstöjning, ε_g	= 0.2 mm/m
Tvärkontraktionstal, ν	= 0.2
Brottenergi, G_F	= 5 N/m

Vid simuleringar har hårdnandeprocessen, utveckling av hållfasthet och styvhet med tiden, inte beaktats utan materialegenskaperna har varit konstanta.



Figur 37 Putsbrukets arbetskurva och materialdata.

Kontakt mellan puts och armering

Kontakten mellan putsen och armeringen modellerades så att det rådde perfekt vidhäftning mellan armering och puts, d.v.s. inga förankringsbrott och glidning mellan armering och bruk har beaktats.

Krympning

Krympning sker till följd av putsens uttorkning. Som beskrevs tidigare sker uttorkningen ensidigt. Inledningsvis är de yttre skikten torrare än de inre, vilket medför att de yttre skikten vill krympa mer än de inre. Vid dessa simuleringar har denna effekt inte beaktats, utan det har antagits att de yttre och inre skikten krymper lika mycket, d.v.s. krymptöjningarna är lika stora i alla delar av putsen.

Beräkningsprogram

Samtliga simuleringar har utförts med det kommersiella finita element programmet DIANA. På grund av att strukturen, belastningen och randvillkoren är symmetriska kring Z-axeln har simuleringen utförts för halva remsan. De bilder som visas nedan visar den del av putsremsan som ligger på den högra sidan av Z-axeln.

2.6.3 Simuleringsresultat

Simuleringsresultaten framgår av figur 38, 39, 40 och 41. I figur 38 visas resultatet av simulering S1. I figuren visas enbart spänningsfördelningen vid olika krympningsnivåer. Färgerna mörk blå, grön, gul, orange och röd visar spänningsnivåer mellan 0 och 1 MPa, blå är lägst och röd är högst. Brukets draghållfasthet är 1 MPa.

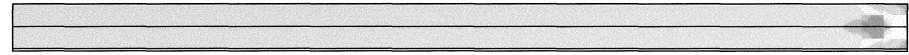
I figur 39 visas resultatet av simulering S2. I figuren visas både spänningsfördelning och utböjning av putsremsan vid olika krympningsnivåer. Spänningsfördelning och utböjning av putsremsan vid simulering S3 framgår av figur 40.

I figur 41 visas utvecklingen hos reaktionskrafter, i X-led, orsakade av förhindrade rörelser vid upplagen A och B. Reaktionskraft är den kraft som upplagen måste utöva för att hålla remsans ändpunkter på plats. I figuren visas även last-töjningskurvan för en putsremsa utan armering. Kurvan är beräknad med förutsättningarna att putsremsan är linjärelastisk med 1 MPa draghållfasthet och 5 GPa elasticitetsmodul. Brottlasten för en remsa med bredden 20 mm och tjockleken 10 mm är 200 N.

S1, Spänningsfördelning, Krympning = 0.02 mm/m



S1, Spänningsfördelning, Krympning = 0.18 mm/m



S1, Spänningsfördelning, Krympning = 0.20 mm/m



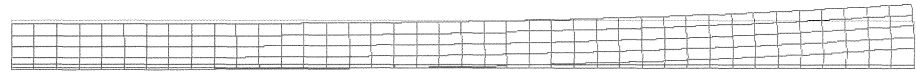
Figur 38

Spänningsfördelning vid olika krympningar. Simulering S1: centrisk placerad armering.

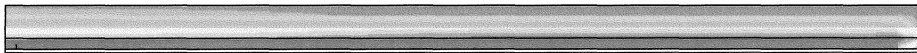
S2, Spänningsfördelning, Krympning = 0.12 mm/m



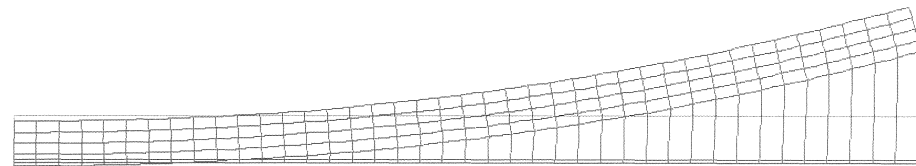
S2, Utböjning, Krympning = 0.12 mm/m



S2, Spänningsfördelning, Krympning = 0.20 mm/m



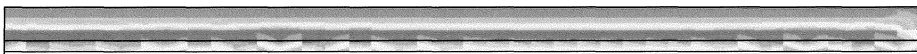
S2, Utböjning, Krympning = 0.30 mm/m



S2, Spänningsfördelning, Krympning = 0.30 mm/m



S2, Spänningsfördelning, Krympning = 0.40 mm/m



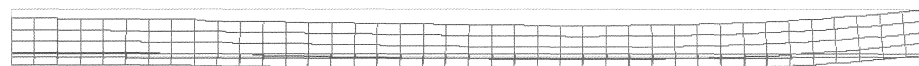
Figur 39

Spänningsfördelning samt utböjning vid olika krympningar. Simulering S2: excentrisk placerad armering och fri vertikal rörelse vid ändpunkterna.

S3, Spänningsfördelning, Krympning = 0.10 mm/m



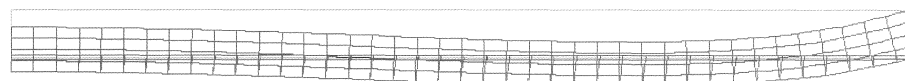
S3, Utböjning, Krympning = 0.10 mm/m



S3, Spänningsfördelning, Krympning = 0.20 mm/m



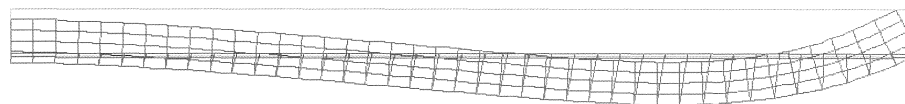
S3, Utböjning, Krympning = 0.20 mm/m



S3, Spänningsfördelning, Krympning = 0.30 mm/m



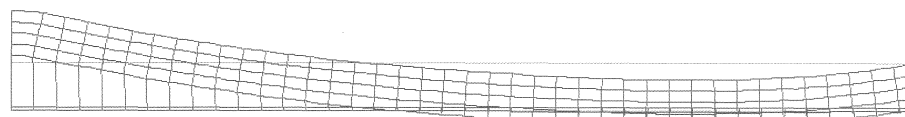
S3, Utböjning, Krympning = 0.30 mm/m



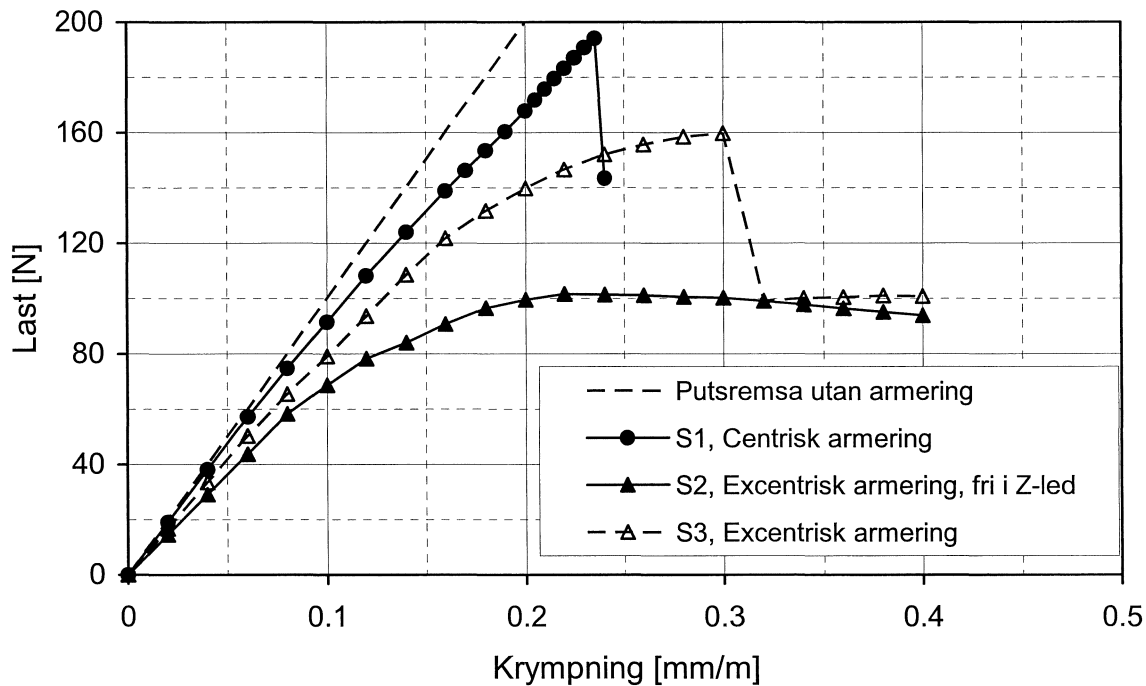
S3, Spänningsfördelning, Krympning = 0.32 mm/m



S3, Utböjning, Krympning = 0.32 mm/m



Figur 40 Spänningsfördelning samt utböjning vid olika krympningar. Simulering S2: excentrisk placerad armering och förhindrad horisontell och vertikal rörelse vid ändpunkterna.



Figur 41 Reaktionskrafter i X-led orsakade av förhindrade rörelser vid ändpunkterna A och B.

Resultatet av S1 visar att höga dragspänningar uppstår vid ändpunkterna redan vid låga krympningsnivåer. Spänningar ökar med ökad krympning och är jämnt fördelade över putsremsan, utan området närmast ändpunkterna. Av figur 41 framgår att kurvan för reaktionskrafterna vid simulering S1 inte sammanfaller med last-töjningskurvan för oarmerad putsremsa. Anledningen är mikrosprickbildning i putsen som orsakas av armeringen. Mikrosprickor bildas i områden med höga dragspänningar. Dessa områden finns där spänningar överförs från armering till puts. Mikrosprickor sänker materialets draghållfasthet och styvhet. Såsom framgår av figur 38 bildas ett område med relativt höga dragspänningar. Detta område växer och flyttas bort från ändpunkterna med ökad krympning. I detta fall är mikrosprickbildningens omfattning inte så stor. I detta fall påverkas inte remsans maximum last (hållfasthet), däremot påverkas remsans styvhet något.

Resultatet av S2 visar att excentriskt placerad armering medför att putsremsans ändpunkter böjs ut, kröks. Höga dragspänningar uppkommer då vid putsremsans underkant, där armeringen är placerad. Vid ökad krympning ökar utböjningen och områden med hög dragspänning växer inåt, d.v.s. bort från ändpunkterna. Som framgår av figuren är dragspänningarna låga vid övre kanten av putsremsan.

Den beskrivna processen medför att mikrosprickor bildas i putsremsans underkant. Putsbruket avlastas och dragspänningarna upptas av armeringen. Detta fenomen kan ses i figur 39 vid krympning = 0.4 mm/m. Begränsade områden med låga spänningar kan observeras vid remsans underkant. När mikrosprickor bildas minskar putsbrukets förmåga att ta upp spänningar. Därför blir reaktionskrafterna lägre än fallet vid S1.

Resultatet av S3 visar att putsremsan trycks in i bädden, isoleringen, samtidigt som den böjs ut. Detta orsakas av den excentriskt placerade armeringen och av att de vertikala rörelserna är förhindrade vid ändpunkterna. Som framgår av figur 40 växer dragspänningarna med ökad krympning. I detta fall uppkommer dragspänningar även i remsans överkant. Vid krympning = 0.30 mm/m är dragspänningarna i putsremsans överkant tillräckligt höga för att orsaka en spricktillväxt på remsans överkant i mitten av remsan ($z = 5$ mm, $x = 0$). Därefter frigörs remsans mittpunkt och böjs uppåt, se utböjningen vid krympning = 0.32 mm/m. Vid detta tillfälle sjunker även dragspänningarna vid remsans överkant och reaktionskraften.

3 DEFORMATIONER OCH SPÄNNINGAR I PUTSADE VÄGGAR

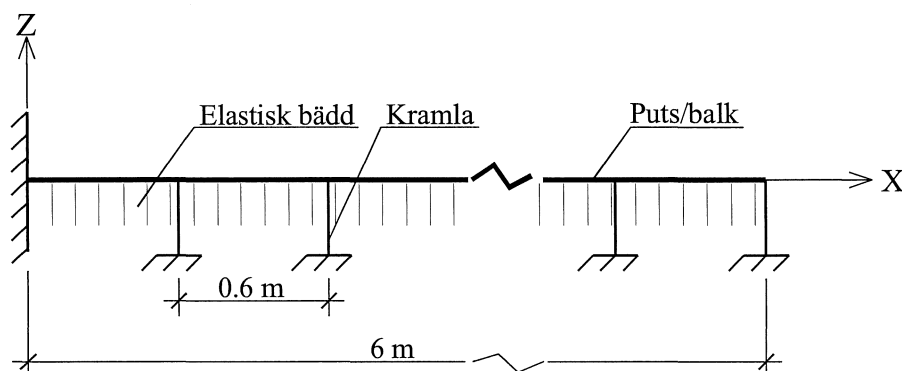
3.1 Teoretiska studier

3.1.1 Inledning

I detta avsnitt redovisas resultaten av numeriska simuleringar av beteendet hos armerade putsväggar utsatta för krympning. Syftet med simuleringarna var att få en bättre förståelse för hur en armerad putsvägg beter sig när den torkas ut. Simuleringarnas resultat jämförs sedan med resultaten av provningar av provväggar Sandin (2004). Det bör noteras att simuleringarna och provningarna inte är identiska. Skillnaderna beskrivs nedan. Simuleringarna är baserade på ungefärliga materialdata och förenklade antaganden. Därför bör simuleringensresultaten betraktas som överslagmässiga.

3.1.2 Simuleringsförutsättningar

Puts på en vägg utsträcker sig i tre riktningar X, Y och Z. X och Y definierar putsens yta och Z är vinkelrätt mot putsens yta och definierar putsens tjocklek. Vid simuleringarna förutsattes att putsen fungerar som en balk i X-Z planet, se figur 42. Balkens längdaxel sammanföll då med X-axeln. Balkens tjocklek, putsens tjocklek, sammanföll med Z-axeln. Tre simuleringar utfördes. Vid två av simuleringarna förutsattes att balken ligger på en elastisk bädd, samt att den är förankrad med kramlor mot ett fast underlag. Kramlornas cc avstånd var 0.6 m. Vid samtliga simuleringar var balken fast inspänt vid ena änden, $x = 0$.



Figur 42 Puts/balk på en elastisk bädd och förankrad med kramlor..

Armeringen var placerade 2.5 mm från balkens underkant.

Simuleringarna avser krympning till följd av uttorkning. Vid simuleringarna förutsattes att putsen torkar ut jämnt, d.v.s. att inga fukt- eller krympningsgradienter förekommer i någon riktning. Vad det gäller provväggarna förekommer fuktgradient under uttorkningen.

Tre typer av simuleringar utfördes vilka beskrivs nedan.

Simulering 1, B1:

Denna simulering utfördes utan elastisk bädd och kramlor. Syftet var att bestämma balkens, putsens, utböjning. Variablerna var balkens tjocklek, 10 och 20 mm, och andel armering 0 – 0.4%.

Simulering 2, B2:

Denna simulering utfördes med elastisk bädd och kramlor. Variablerna var krympningens storlek, 0 - 0.6 mm/m, och balkens tjocklek, 10 och 20 mm.

Simulering 3, B3:

Denna simulering utfördes utan elastisk bädd men med kramlor. Variabeln var krympningens storlek, 0 - 0.4 mm/m. Balkens tjocklek var 10 mm.

Elastisk bädd

Den elastiska bädden simulerar effekterna av isoleringen bakom putsen. Den materialegenskap som beskriver bäddens beteende är bäddmodulen, K , [N/mm^3]. Bäddmodulen definieras som den kraft per ytenhet som krävs för att trycka ihop bädden 1 längdenhet. Bäddmodul sattes lika med $1.54 \cdot 10^{-3} \text{ N}/\text{mm}^3$ i samtliga simuleringar. Bäddmodulen beräknades med förutsättningen att isoleringen är 50 mm och har en elasticitetsmodul (kompressionsmodul) motsvarande $0.077 \text{ N}/\text{mm}^2$. Isoleringens kompressionsmodul bestämdes inte. Det värde som anges här är baserat på uppgifter från Kurskompendiet i byggnadsmaterial (1992). Den bäddmodul som användes i avsnitt 2.6 är en uppskattning.

Kontakt mellan putsremsa och elastisk bädd

Kontakten mellan putsen och den elastiska bädden modellerades så att tryck- och skjuvspänningar kunde överföras när putsremsan trycktes mot bädden, medan inga spänningar kunde överföras då putsen drogs ifrån bädden.

Kramla

Kramlan antogs att fungera som en fjäder som kopplar putsen till ett fast underlag. Vidare förutsattes att kramlan kunde ta upp drag- och tryckkrafter i sin axels riktning, d.v.s. Z-riktning. Kramlan kunde då motverka putsens utböjning. Kramlans styvhet i riktning vinkelrätt mot dess längdaxel sattes lika med 0 vilket innebär att kramlan inte motverkade putsens rörelser i putsens eget plan. Det fanns inga data om kramlans styvhet. Genom att hänga en bestämd vikt på en kramla och mäta deformationen uppskattades kramlans styvhet till $92.4 \text{ N}/\text{mm}$.

Armering

Det armeringsnät som används för putssystemen är gjort av stål. Nätets maskvidd är 20 mm och trådens diameter är 1 mm. Armeringsmängden som användes vid simuleringarna B2 och B3 motsvarar den här typen av armeringsnät. Det förutsattes att spänningar i tråden inte överstiger trådmaterialets sträckgräns. Stålets elasticitetsmodul, E_s , sattes till 200 GPa.

Putsbruk

Samma material som i avsnitt 2.6.2.

Kontakt mellan puts och armering

På samma sätt som i avsnitt 2.6.2.

Krympning

På samma sätt som i avsnitt 2.6.2.

Beräkningsprogram

Samtliga simuleringar har utförts med det kommersiella finita element programmet DIANA.

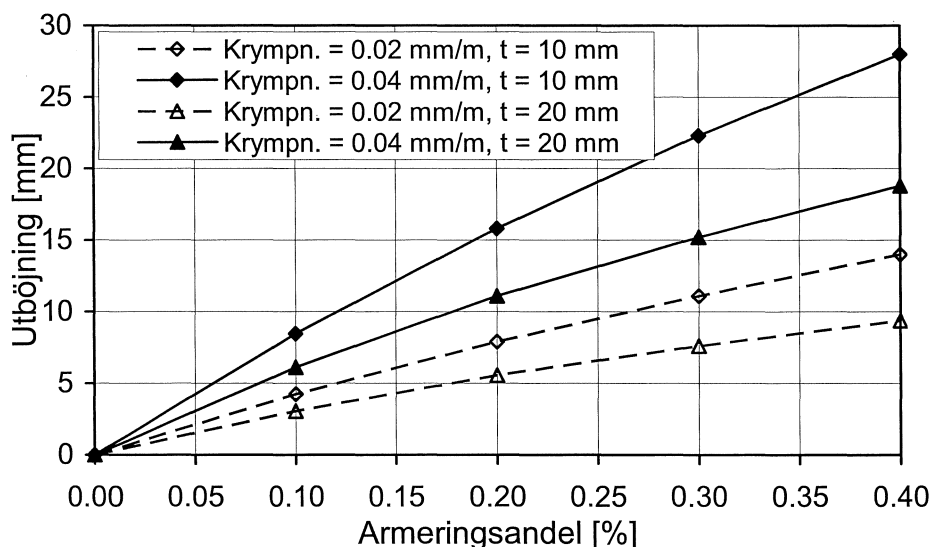
3.1.3 Simuleringsresultat

Vid simulering B1 bestämdes utböjningen hos en 6 m lång armerad putsskiva, balk, orsakad av uttorkningskrympning och excentriska placerad armering. Vid denna simulering betraktades putsskivan som en konsolbalk fastinspänd vid $x = 0$, se figur 42. Ingen bädd och kramla togs med i beräkningen. Figur 43 visar exempel på utböjningen.



Figur 43 Utböjning av putsskiva utan inverkan av elastisk bädd och kramlor.

I figur 44 visas maximum utböjningen hos putsskivor med olika armeringsandelar. Beräkningarna är utförda för putstjocklekarna 10 mm respektive 20 mm vid två olika krympningsnivåer. Det armeringsnät som normalt används, d.v.s. stål nät med maskvidden 20 mm och tråddiametern 1 mm, motsvarar 0.4% armeringsandel för 10 mm putsskiva samt 0.2% armeringsandel för 20 mm putsskiva.



Figur 44 Utböjning av putsskiva som funktion av armeringsandel.

Vid samma armeringsandel är den tunnare putsskivans utböjning större än den tjockare putsskivan, se figur 44. Anledningen är att en tunn skiva har lägre böjmotstånd än en tjock skiva. Det moment som uppkommer p.g.a. att armeringen sitter excentrisk böjer den tunna skivan mer än den tjocka skivan. Skillnaden växer med ökad armeringsandel. Skillnaden blir ännu större om jämförelsen utförs med armeringsarea i stället för armeringsandel. Jämför utböjningen för armeringsandelen 0.4% hos den tunna skivan med utböjningen för armeringsandelen 0.2% hos den tjocka putsskivan. Skillnaden mellan utböjningarna ökar även med ökad krympning.

När putsen appliceras på en isolering och förses med kramlor motverkas utböjningarna av kramlorna, vilket leder till spänningar och eventuellt sprickor i putsskivan. Detta har studerats i simulering B2. Resultaten framgår av figur 45 – 48.

I figur 45 och 47 visas momentets variation i X-riktning vid olika krympningsnivåer. I Figur 46 och 48 visas moment som funktion av krympning på två ställen, dels vid inspänningsnittet, $x = 0$, och dels på det ställe som maximum momentet uppstår. Momentet ger dragspänningar på putsskivans överkant, d.v.s. på den motsatta kanten som armeringen sitter. Momentet redovisas per breddenhet putsskiva, d.v.s. att momentet har sorten Nm/m. Simulering B2 har utförts upptill 0.6 mm/m krympning.

Vad det gäller 10 mm putsskivan, vid 0.10 mm/m krympning, är momentet konstant, ca 1.7 Nm/m, för $x < 4$ m. Efter $x = 4$ m minskar momentet och sedan ökar till ett maximum värde, ca 24 Nm/m, och vid $x = 6$ m är momentet lika med noll. Vid ökad krympning ökar momentet med bibehållen fördelnings-

form. Vid 0.58 mm/m krympning uppnås putsskivans böjdraghållfasthet och putsskivan spricker nära den fria änden. Därefter, vid 0.6 mm/m krympning, sjunker momentet i detta område. Om putsskivan inte varit upplagd på en elastisk bädd och inte varit försedd med kramlor hade den deformerats såsom visas i figur 43. Kramlorna motverkar deformationerna och samtidigt som vissa ställen trycks mot bädden vilken förklarar att spänningar uppstår i putsskivan. Den fria änden vill röra sig mest därför utsätts området nära den änden för större spänningar. Provingar med putsade väggar i fullskala visar att putsskivan spricker även nära den fria änden, se Sandin (2003 och 2004).

Momentets utveckling som funktion av krympning, för 10 mm putsskivan, framgår av figur 46. Figuren visar momentutvecklingen vid den punkt där maximum momentet uppkommer och vid inspänningssnittet. Som framgår av figuren ökar momentet linjärt med ökad krympning. När putsen börjar spricka blir momentutvecklingen icke linjär. Om beräkningen hade fortsatt hade nya spruckna områden tillkommit. Man kan säga att balken blir "kortare" med ökad krympning. Den delas upp i segment med viss längd. Som framgår av figur 45 håller ett nytt område med maximum moment på att bildas vid $x = 4.5$ m, vilket betyder att ett segment med längden 1 m så småningom bildas som fungerar "oberoende" av övriga delarna. Detta syns i praktiken då stora spruckna delar syns. Beräkningen kunde inte fortsätta på grund av begränsningar i modelleringen.

Den 20 mm skivan beter sig ungefär på samma sätt som den tunna. Den största skillnaden är momentets storlek nära den fria änden, vilken är betydligt lägre hos den tjocka putsskivan. Detta förklaras med det faktum att den tjockare putsskivans utböjning är mycket mindre än den tunnare putsskivan, se simulering B1. I detta fall är maximum momentet ca 15 Nm/m och momentet vid inspänningssnittet är ca 12 Nm/m.

Vid beräkningen antogs att putsens draghållfasthet är 1 MPa. Spröda materialens böjdraghållfasthet är högre än deras draghållfasthet, se Fagerlund 2000. För tunna skivor är böjdraghållfastheten ca 50% högre än draghållfastheten, d.v.s. man kan i detta fall anta en teoretisk böjdraghållfasthet av storleksordningen 1.5 MPa.

Inom sträckan $0 < x < 4$ m är momentet jämnt fördelat längs med X-axeln hos båda putsskivorna. Inom detta område är momentet lika stort i båda fallen vilket betyder att den tunnare skivan utsätts för större dragspänningar, ca 4 gånger större eftersom spänning är omvänt proportionell mot tjockleken i kvadrat, än den tjockare putsskivan. Moment av storleksordningen 12 Nm/m medför 0.72 MPa dragspänning hos den tunna putsskivan. Den motsvarande dragspänningen hos den tjocka putsskivan är 0.18 MPa. Dragspänningarna på grund av maximum momentet är 1.44 MPa respektive 0.23 MPa för den tunna respektive för den tjocka putsskivan.

Simulering B2 visar att den tunna skivan spricker nära den fria änden om krympningen uppnår 0.6 mm/m. Däremot spricker inte de övriga delarna av skivan. Resultatet visar dock att spänningsnivån kan bli relativt hög. I praktiken spricker putsskivorna på flera ställen, se Sandin (2003 och 2004). Skillnaden mellan beräkningen och de fall beskrivna i Sandin (2003 och 2004) är att beräkningarna har utförts till 0.6 mm/m krympning. Putsskivorna krymper mycket mer än 0.6 mm/m. Vidare antas vid beräkningarna att putsens mekaniska egenskaper är konstanta och inte ändras med tiden, d.v.s. ingen hänsyn togs till brukets hårdnande. Dessutom bortsågs från effekterna av fuktgradient och återuppfuktning.

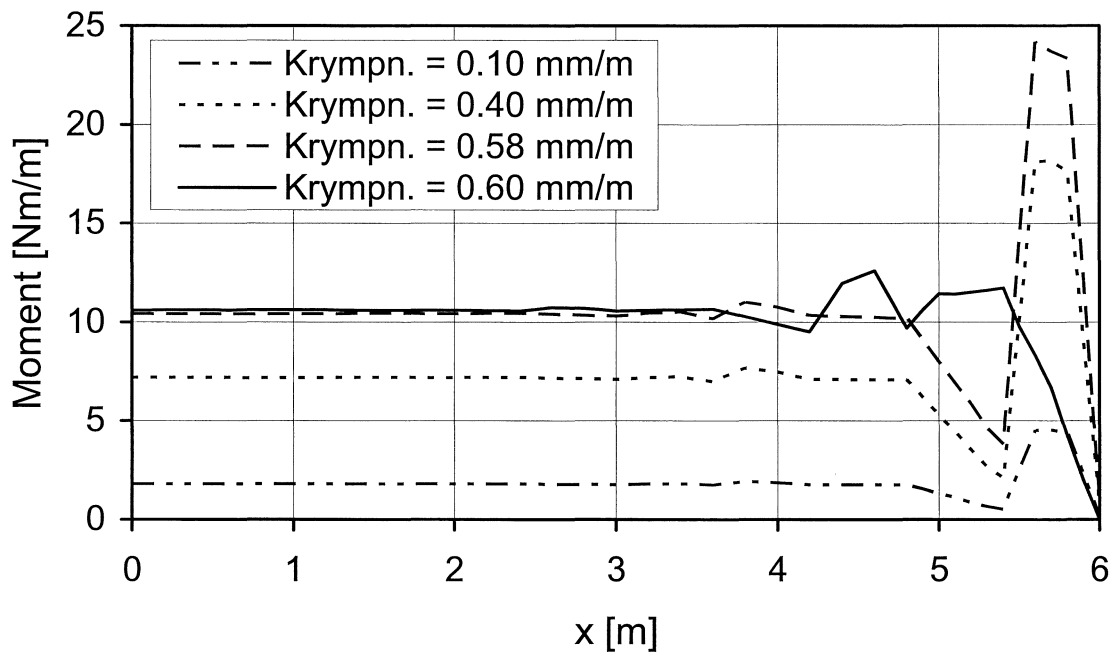
Enligt simulering B2 är spänningarna relativt låga hos den tjockare putsskivan, därmed är risken för sprickbildning mindre. Även i detta fall har antagandena påverkat resultatet. Dessutom bör tilläggas att inverkan av fuktgradient och återuppfuktning kan bli större hos en tjock putsskiva.

Resultatet av simulering B3 framgår av figur 49 och 50. Denna simulering är utförd på samma sätt som B2. Den enda skillnaden är att den elastiska bädden inte har tagits med i beräkningen. Kramlorna är modellerade på samma sätt som i simulering B2. Simuleringen är utförd för 10 mm putsskiva.

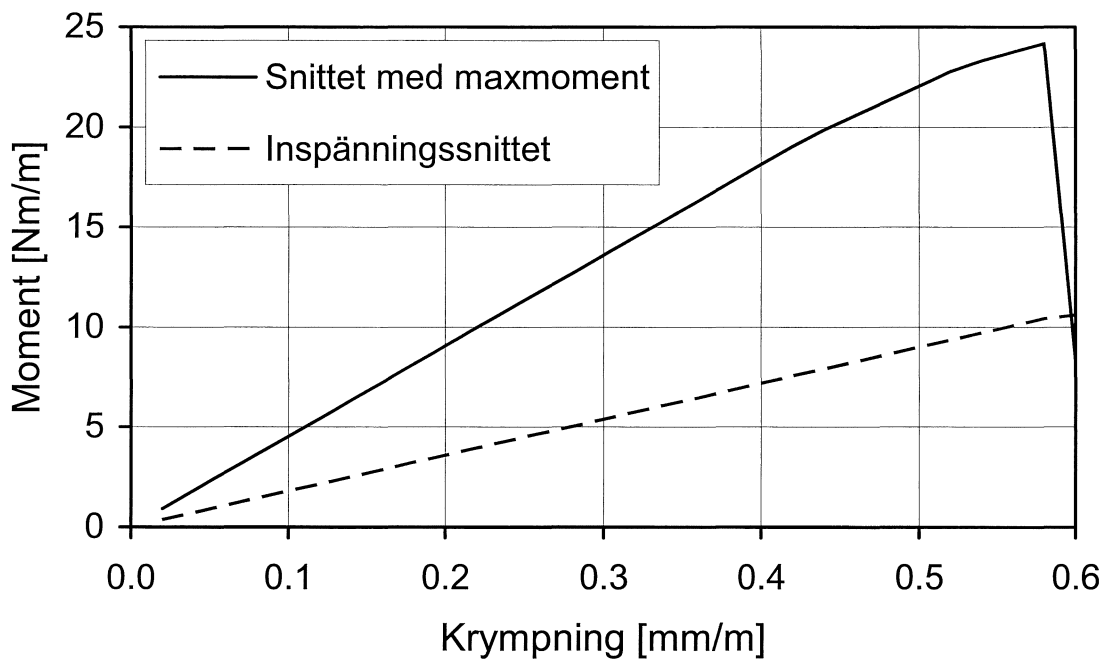
Resultatet visar att den elastiska bädden har stor inverkan på momentfördelningen och på maximum momentets storlek. Momentet i inspänningssnittet är dock oförändrat, jämför figur 46 med 50.

Momentfördelningens form i simulering B3 liknar formen hos momentfördelningen för 20 mm puts-skivan i simulering B2. Detta kan bero på styvhetsförhållandena, nämligen att en 20 mm putsskiva är styv i förhållande till den antagna elastiska bädden och i simulering B3 saknas den elastiska bädden vilken kan likställas med en bädd med bäddmodulen 0. Alltså i simulering B3 är den 10 mm putsskivan ”mycket styv” i förhållande till den ”elastiska bädden”, som inte finns.

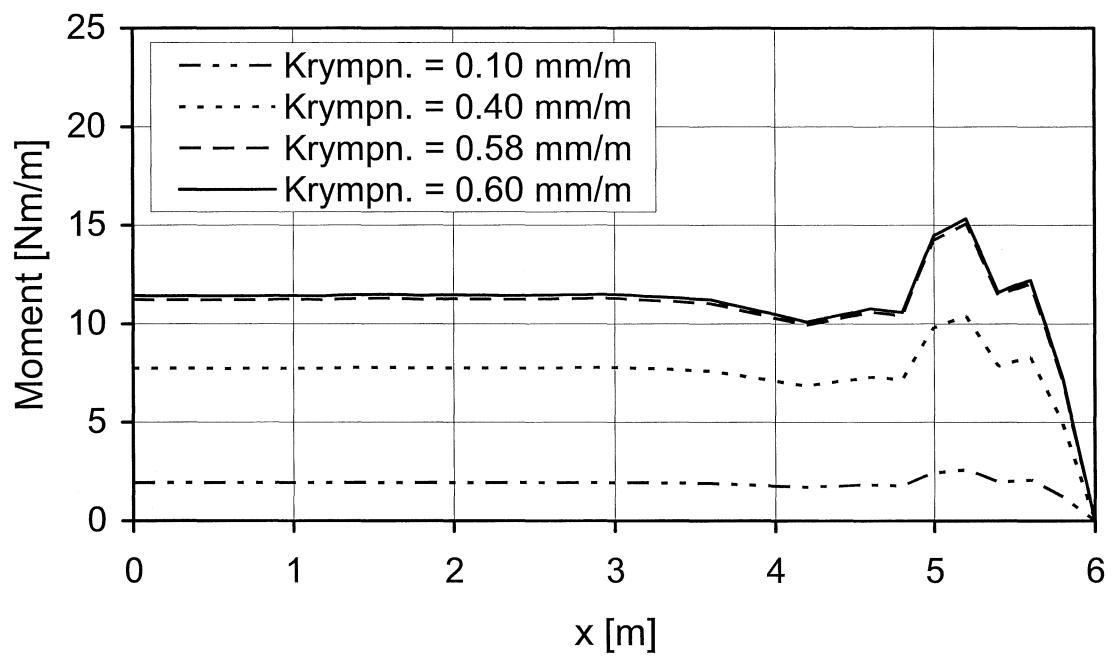
Det bör noteras att samtliga simuleringar har utförts med osäkra materialdata, till exempel brukets mekaniska egenskaper, bäddmodulen och kramlornas egenskaper. Vidare, bör noteras att effekter från fuktgradient, upprepade uttorkning och uppfuktning inte har tagits med i beräkningarna.



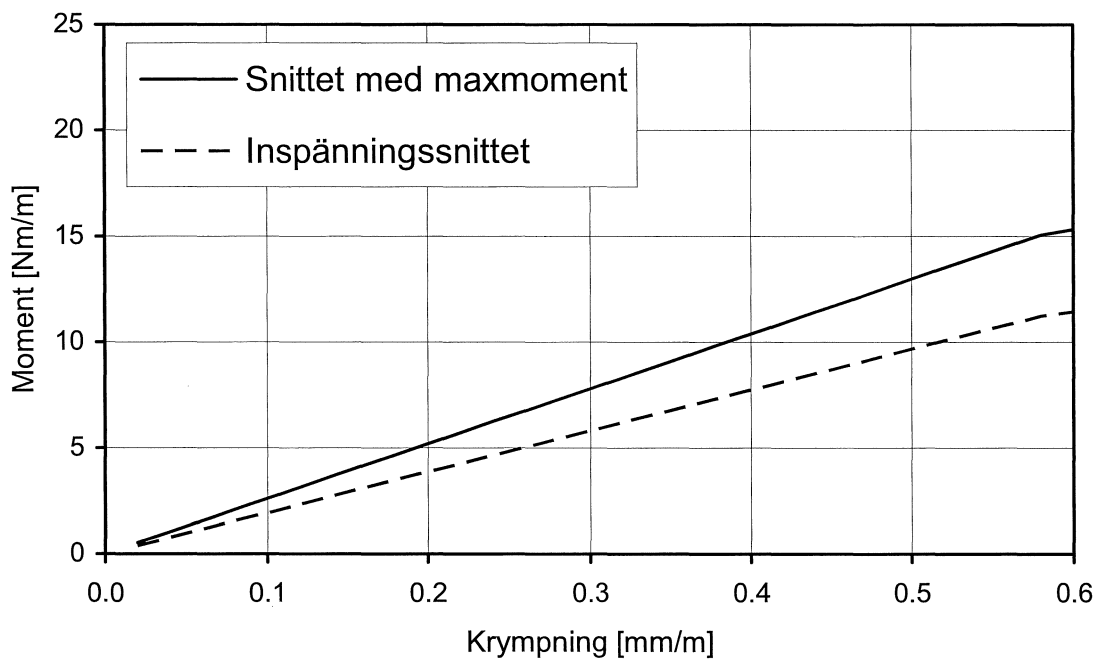
Figur 45 Momentfördelning för 10 mm puts-skiva.



Figur 46 Moment som funktion av krympning för 10 mm puts-skiva.



Figur 47 Momentfördelning för 20 mm putsskiva.



Figur 48 Moment som funktion av krympning för 20 mm putsskiva.

3.2 Jämförelse med provning av putsade väggar i stor skala

I Sandin (2003 och 2004) presenteras resultaten av provning av provväggar. Provningarna omfattade olika puts-system med varierande putstjocklek. De traditionella systemen d.v.s. de med armeringsnätet placerat direkt mot isoleringen uppvisade omfattande sprickbildningar. De system som utgjordes av 10 mm puts sprack redan vid första uttorkningen de tjockare systemen sprack några dagar efter första vattningen. Första vattningen ägde rum efter några veckors uttorkning.

Även system med armeringen placerad närmast utsidan provades. Med insida menas här den sida som är i kontakt med isoleringen. Dessa system uppvisade ingen sprickbildning.

Syftet med detta avsnitt är inte att redovisa provväggarnas resultat, utan redogöra för de begränsningar som beräkningarna har.

I Sandin (2004) anges några mekanismer som kan vara orsaken till att provväggarnas puts sprack. Mekanismerna återges nedan:

1. *Brukets krympning förhindras av stålnätarmeringen. Om armeringen ligger mitt i putsen uppstår dragspänningar både på in- och utsidan. Denna krympning medför ett stort antal små mikrosprickor som är osynliga för ögat. Denna mekanism gäller alltid.*
2. *Om armeringen är excentrisk, vilket gäller i aktuellt system, förhindras krympningen där armeringen finns. Detta medför en krökning av putsen och ytterligare dragspänningar uppstår i ytorna.*
3. *Kramlorna vill förhindra krökningen enligt punkt 2 varvid ytterligare dragspänningar uppstår. Störst dragspänning under uttorkningen uppstår på utsidan mitt emellan kramlorna.*
4. *Fuktgradienter i putsen vill kröka putsen, vilket medför spänningar. Armeringen håller emot denna krökning, varvid ytterligare spänningar uppstår. Dessa kan vara både tryck- och dragspänningar.*
5. *Kramlorna kommer att förhindra krökningen på grund av fuktgradienten, vilket medför ytterligare spänningar.*

Alla ovannämnda mekanismerna kan samverka och verka samtidigt. Om den sammanlagda spänningen överstiger brottspänningen uppstår sprickor. Sprickutseendet beror delvis på putsens härdningsgrad, Sandin 2004.

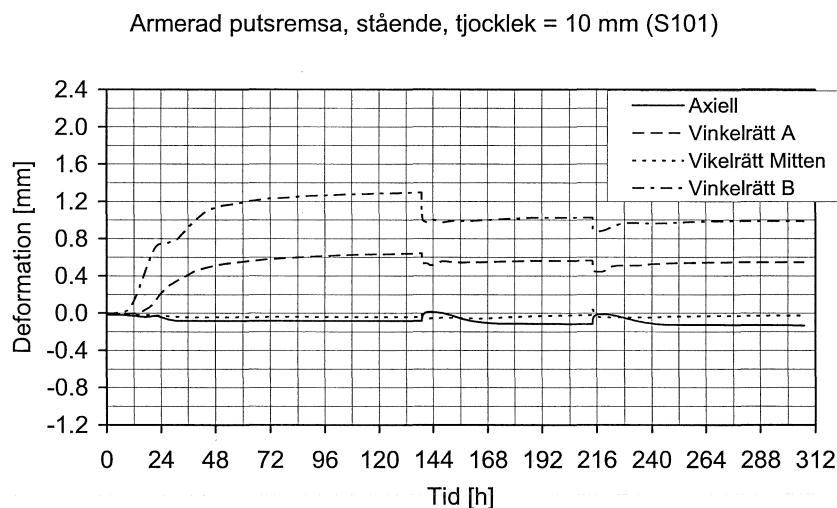
Mekanism 1 är visad med hjälp av experiment utförda med putsremсор. Som visades i avsnitt 2.3 var den armerade putsremsans krympning betydligt mindre än den oarmerade, vilken tyder på att armeringen motverkar putsens krympning. Detta kan medföra att putsen blir utsatt för dragspänningar. I dagsläget är det svårt att bedöma dragspänningarnas storlek eftersom en del av krympningen sker under den tid då putsbruket hårdnar samt att putsbruket, på grund av utvecklade vidhäftning, kan glida i förhållande till armeringen. Effekten av putsbrukets hårdnande och glidning har inte beaktats vid beräkningarna

Mekanism 2, d.v.s. krökningen, är också visad med hjälp av experiment utförda med putsremсор och beräkningarna.

Mekanism 3 har inte undersökts experimentellt. Beräkningarna som redovisas i avsnitt 2.6 och 3.1 visar att kramlor kan förhindra putsens krökning, vilken kan leda till sprickbildning. Risken för sprickbildning beror bl. a. på kramlornas och isoleringens styvhet, vilka inte har studerats närmare.

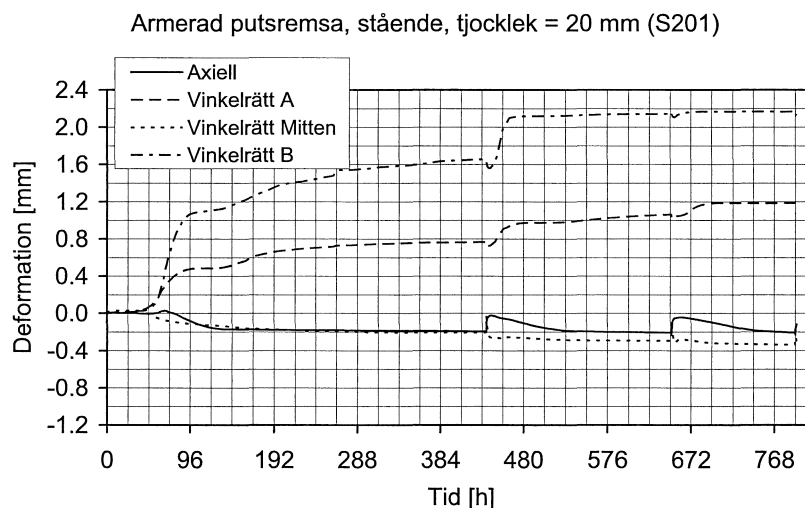
Effekten av mekanism 4 har inte studerats. Men provningar på oarmerade putsremсор, figur 10a och 11a, och beräkningar i avsnitt 2.4 visar att en fuktgradient medför spänningar i putsremsan

som kan leda till sprickbildningar. Fuktgradienten har inte stor inverkan vid uttorkningen efter appliceringen, däremot kan den ha stor inverkan efter första uppfuktningen. Utfallet från fuktgradientens inverkan kan vara olika beroende på putsens tjocklek, vilket framgår av figur 10 och 11. Som framgår av figur 11b (armerad putsremsa) ökar 20 mm putsremsans krökning när den bevattnas efter uttorkningen, tid = 432 timmar. Medan den 10 mm putsremsans krökning minskar något, figur 10b armerad putsremsa.



Figur 10b.

Figur 10 Deformationer hos 10 mm stående putsremsor som funktion av tiden samt rådande RF och temperatur, S101.



Figur 11b.

Figur 11 Deformationer hos 20 mm stående putsremsor som funktion av tiden samt rådande RF och temperatur, S201.

Mekanism 5 har inte studerats. Men provningarna, se figur 10 och 11, visar att de oarmerade putsremsorna kröker vid uttorkning och uppfuktning.

I Sandin (2004) ställs och besvaras två frågor vilka återges nedan:

Varför sker inte alltid sprickbildning i samband med initialuttorkningen?

Fuktgradienterna i detta skede är relativt små, vilket medför att mekanismerna 1-3 torde vara dominerande. Man kan sålunda bortse från mekanismerna 4-5.

Under initialuttorkningen är putsens hållfasthet och vidhäftning till armeringen låg. Putsen är också plastisk till viss utsträckning. Det senare medför plastisk deformation som inte ger några sprickor eller spänningar. Den låga vidhäftningen mellan puts och armering medför att det kan uppstå glidning mellan puts och armering, vilket i sin tur medför att armeringen inte förhindrar krympningen. Sammantaget innebär detta att de spänningar som byggs upp blir små och risken för synlig sprickbildning blir då liten.

Varför sker omfattande sprickbildning i samband med den första vattningen?

I detta skede har den största delen av initialkrympningen skett. Putsen har hög hållfasthet och vidhäftning till armeringen och därmed dominerar punkterna 4-5. Fuktgradienter under uppfuktning och uttorkning medför att spänningar byggs upp fullt ut. Ingen väsentlig plastisk deformation sker. Spänningarna kan bli stora och sammantaget medföra enstaka större sprickor.

I avsnitt 3.1 visades genom beräkningar att storleken hos de spänningar som uppstår på grund av mekanism 1-3 beror också på putsens tjocklek, ju tunnare puts desto högre blir spänningarna. Detta kan vara förklaringen på varför 20 mm putsen på provväggarna inte spricker under initialuttorkningen.

Vid initialuttorkningen bildas dragspänningar på putsens utsida. När putsen besprutas med vatten bildas en fuktgradient, fuktigast på utsidan och torrast på insidan där armeringen finns. Denna fuktgradient ger upphov till ytterligare dragspänningar på putsens utsida som adderas till existerande spänningarna. Om spänningarna överstiger materialets draghållfasthet spricker putsen. Det bör noteras att krympningen minskar något på grund av vattenbesprutningen. Detta kan leda till att de dragspänningar som orsakades av den initiala uttorkningen kan minska något. Detta framgår t. ex. av figur 10b som visar att 10 mm putsremsans krökning minskar något vid vattenbesprutning. Däremot ökar krökningen hos 20 mm putsremsan, figur 11b. Hur spänningarna läggs på varandra är inte klarlagd. Det är helt klart att sprickbildningen orsakas av ovanstående mekanismer. Men det är oklart vilken/vilka mekanismer som är dominerande. Putsens tjocklek har möjligen stor inverkan.

För vissa provväggar placerades armeringen på utsidan av putsen. Inga sprickor kunde noteras. Detta visar att armeringen på utsidan tar upp de dragspänningar som uppkommer på putsens utsida.

Den kombinerade effekten av samtliga beskrivna mekanismerna har inte beaktats vid beräkningarna, vilken är den största begränsningen hos beräkningarna, bortsett från avsaknad av exakta materialegenskaper.

4 SLUTSATSER

Målet med arbetet var att klarlägga de mekanismer som ligger bakom sprickbildningar i puts på isolering. En del av mekanismerna har identifierats och anges nedan på samma sätt som de har beskrivits i Sandin (2004):

1. Brukets krympning förhindras av stålnätarmeringen. Om armeringen ligger mitt i putsen uppstår dragspänningar både på in- och utsidan. Denna krympning medför ett stort antal små mikrosprickor som är osynliga för ögat. Denna mekanism gäller alltid.
2. Om armeringen är excentrisk, vilket gäller i aktuellt system, förhindras krympningen där armeringen finns. Detta medför en krökning av putsen och ytterligare dragspänningar uppstår i ytorna.
3. Kramlorna vill förhindra krökningen enligt punkt 2 varvid ytterligare dragspänningar uppstår. Störst dragspänning under uttorkningen uppstår på utsidan mitt emellan kramlorna.
4. Fuktgradienter i putsen vill kröka putsen, vilket medför spänningar. Armeringen håller emot denna krökning, varvid ytterligare spänningar uppstår. Dessa kan vara både tryck- och dragspänningar.
5. Kramlorna kommer att förhindra krökningen på grund av fuktgradienten, vilket medför ytterligare spänningar.

I verkligheten förekommer ytterligare mekanismer utöver de ovanstående. Som exempel kan nämnas temperaturgradient och vindbelastning. Dessa mekanismer har inte studerats.

Det har konstaterats att risken för sprickbildning i samband med initialuttorkning är större hos tunnare puts, 10 mm puts, än tjockare puts, 20 mm. Däremot kan tjockare puts spricka vid efterföljande vattningen.

5 FRAMTIDA ARBETEN

5.1 Experimentellt arbete

De redovisade provningarna gällde ett putsbruk och putsremsor med armering placerad på den sida som torkar sist. Putsremsan var fri att deformera och var inte utsatt för yttre tvång. Experimenten bör upprepas med andra typer av bruk, annan placering och typ av armering samt olika typer av yttre tvång t.ex. kramlor. Även inverkan av olika isolering bör studeras

Fuktgradienten var okänd vid de provningar som redovisades här. Den bör bestämmas och dess effekt på sprickbildningen studeras. Som konstaterades tidigare kan fuktgradienten vara den utlösande faktorn vad det gäller sprickbildning vid vattning efter initialuttorkningen.

Man bör även utsätta remsorna för temperaturväxlingar, temperaturgradient samt laster som efterliknar vindlaster.

Storleken hos de spänningar och töjningar som uppkommer i putsbruket beror på det hårdnandestadium som bruket befinner sig i när uttorkningen/krympningen sätts igång. Om bruket är mjukt och svagt glider den i förhållande till armeringen. Då bildas inga spänningar och putsremsan kröker sig inte. Om däremot bruket är styvt och starkt bildas spänningar och putsremsan kröker sig. Det är viktigt att klargöra sambandet mellan brukets mognadsålder (hårdnandestadiet), krympning samt de spänningar och töjningar som uppkommer. Dessa samband är grundläggande parametrar för bedömning av risken för sprickbildningen.

Samband mellan fukttillstånd och krympning är också mycket viktigt. Speciellt då inverkan av fuktgradient skall studeras.

5.2 Teoretiskt arbete

Noggrannare beräkningsmodell än den som visades i avsnitt 2.6 bör utföras. Modellens remsor bör göras lika de som provas. Effekter som mognadsgradsutveckling (hårdnandeprocess), glidning mellan armering och bruk, fuktgradient, uttorkning och uppfuktning, putstjocklek, placering av armering, samt styvhet hos isolering och kramlor bör beaktas.

6 REFERENSER

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

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

Hassanzadeh, Manouchehr, (2001), SPRICKBILDNING I PUTS PÅ ISOLERING, Inledande laboratorieförsök och parameterstudier, Rapport TVBM-3099, Avdelningen för Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola.

Helmuth, R. A., 1961, Dimensional Changes of Hardened Portland Cement Pastes Caused by Temperature Changes, Highway Research Board Proceedings vol. 60(1961).

Byggnadsmaterial, Allmän kurs, 1992, Kompendium, Avdelningen för Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola.

Nevander, Lars Erik och Elmarsson, Bengt, 1994, Fukthandbok – Praktik och Teori, AB Svensk Byggtjänst.

Park, R. and Paulay, T., 1975, Reinforced Concrete Structures, John Wiley & Sons.

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

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

Sandin, Kenneth, (2002), SPRICKBILDNING I PUTS PÅ ISOLERING, Inledande studier av putsens krympning och svällning, Rapport TVBM-3101, Avdelningen för Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola.

Sandin, Kenneth, (2003), SPRICKBILDNING I PUTS PÅ ISOLERING, Inledande försök på provväggar, Rapport TVBM-3108, Avdelningen för Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola.

Sandin, Kenneth, (2004), SPRICKBILDNING I PUTS PÅ ISOLERING, Försök på provväggar, Rapport TVBM-3116, Avdelningen för Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola.