LUND UNIVERSITY

Byggnadsmaterials reologi: problemställningar och litteratur

Nielsen, Anders

1968

Link to publication

Citation for published version (APA):
Nielsen, A. (1968). *Byggnadsmaterials reologi: problemställningar och litteratur*. [Licentiatavhandling, Avdelningen för Byggnadsmaterial]. Tid. Institutionen för byggnadsteknik, Tekniska högskolan i Lund.

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

ARKIVEX

INSTITUTIONEN FÖR BYGGNADSTEKNIK
TEKNISKA HÖGSKOLAN I LUND

DIVISION OF BUILDING TECHNOLOGY
THE LUND INSTITUTE OF TECHNOLOGY

BYGGNADSMATERIALS REOLOGI

PROBLEMSTÄLLNINGAR OCH LITTERATUR

RHEOLOGY OF BUILDING MATERIALS

PROBLEMS AND LITERATURE

ANDERS NIELSEN

BULLETIN 3

LUND, SWEDEN 1968

INSTITUTIONEN FÖR BYGGNADSTEKNIK
TEKNISKA HÖGSKOLAN I LUND

DIVISION OF BUILDING TECHNOLOGY
THE LUND INSTITUTE OF TECHNOLOGY

BYGGNADSMATERIALS REOLOGI

PROBLEMSTÄLLNINGAR OCH LITTERATUR

RHEOLOGY OF BUILDING MATERIALS

PROBLEMS AND LITERATURE

ANDERS NIELSEN

BULLETIN 3

LUND, SWEDEN 1968

Bulletin nr 3

ERRATA

Sid	Rad	Står	Läs
18	8	$\dot{\varepsilon} = \sigma/E + \dot{\sigma}/\eta$	$\dot{\varepsilon} = \dot{\sigma}/E + \sigma/\eta$
18	13	$\ldots(E_2 t/\eta_2))/F$	$\ldots(E_2 t/\eta_2))/E_2$
23	1	$+ \varepsilon_{c1}$	$+ \varepsilon_{ct}$
23	2	σ_1	σ_t
24	11	ca 3/4	större delen
35	1	E/γ växer med kristalliniten	E/γ växer med kristalliniteten
38	24	den yttre kraften	deformationsmotståndet
53	3-4		HEDBERG,B, BERNTSSON,L och MALINOWSKI,R : Värmebehandlingens inverkan på relaxationen i förspänningsstål. Inst. för byggnadsteknik,CTH Rapport nr 691. Göteborg 1966
53	29	KINGSTON och CLERK	KINGSTON, R S T och CLARKE, L N
Fig.3.1		I figurtexten tillfogas: Konstant spänning	
Fig.3.3		I figurtexten tillfogas: Resultatet är korrigerad för krympning.	

INNEHÅLL

	sid
Förord	4
1. Inledning	5
2. Allmänt om reologi	
2.1. Historik	7
2.2. Definition	8
2.3. Byggnadsmaterialreologi	9
2.4. Reologilitteratur	10
3. Deformationsbeskrivning	
3.1. Översikt, deformationstyper	12
3.2. Idealmaterial	13
3.3. Reologiska modeller	15
3.4. Krypningens tidsberoende	19
3.5. Krypningens spännings- och temperaturberoende	20
3.6. Krypning och relaxation	22
3.7. Krypmått	23
3.8. Krypning och krympning, dimensionsberoende	24
3.9. Tixotropi	25
4. Material	
4.1. Beskrivningens omfattning	27
4.2. Hårdnad betong	27
4.2.1. Begrepp, litteratur	27
4.2.2. Orsaker till krypning	28
4.2.3. Krypningsbeskrivning	30
4.2.4. Porballastbetong	32
4.3. Gasbetong	33
4.4. Trä	33
4.4.1. Begrepp, litteratur	33
4.4.2. Orsaker till krypning	34
4.4.3. Krypningsbeskrivning	35
4.4.4. Träbaserade produkter	37

sid

4.5. Metaller 38

4.5.1. Begrepp, litteratur 38

4.5.2. Kryporsaker 39

4.5.3. Förspänningsstål 40

4.5.4. Aluminiumlegeringar 43

4.6. Andra fasta material 45

4.7. Färsk betong 45

5. Avslutning 47

Sammanfattning 48

English summary 49

Litteratur 50

Symboler 58

Tabell 1

Tabell 2

Figur 3.1. - 3.4.

Figur 4.1. - 4.9.

Litteraturreferenserna har i texten angivits med understruket författarnamn efterföljt av utgivningsåret inom parentes, t ex Altenpohl (65).

Förord

I föreliggande rapport redovisas några problemställningar inom byggnadsmaterialreologin baserade på studier av en del av den stora mängd litteratur som finns på området.

Termen reologi har under det sista decenniet blivit allmänt använd i byggnadstekniken. De reologiska problemen, huvudsakligen krypning och krympning, har emellertid varit kända under mycket längre tid. - Byggnadsmaterials reologi har stått på forskningsprogrammet för avdelningen för Byggnadsmateriallära vid LTH sedan denna avdelnings start 1964.

Litteraturbevakningen, som på grund av ämnets omfattande karaktär långtifrån kan bli fullständigt effektiv, har huvudsakligen varit riktad mot Västeuropa och Amerika. Källor från Östeuropa har endast sporadiskt medtagits.

Det är vanskligt att sammanpressa ett så stort ämne i en översikt. Författaren är då också medveten om, att många invändningar kan resas mot framställningen. Det är dock författarens förhoppning, att rapporten skall ge ett intryck av de möjligheter till tvärvetenskapligt tänkande, som reologin erbjuder.

Författaren ber härmed att få framföra sitt tack till prof S G Bergström för hjälp och intresse under arbetet, och till sekreterarna fröken Kerstin Krahner och fru Aina Persson, kartriterskan Birgitta Ericson och ingenjör Gunvor Hällnor för noggrant och omsorgsfullt reproduktionsarbete. Tack till Kirsten för visad tålmodighet.

Arbetet har finansierats av Statens Råd för Byggnadsforskning. Det har utförts vid institutionen för Byggnadsteknik, LTH, avd för Byggnadsmateriallära, och framlägges härmed tillsammans med rapporten "Krypning hos högtrycksånghärdad gasbetong" som licentiatavhandling vid nämnda avdelning.

Lund den 4 aug 1968

Anders Nielsen

The basis of research is,
or should be, complete scepticism.
W W Barkas.

1. INLEDNING

Avsikten med föreliggande rapport är, dels att ge en översikt över vad reologi är med avseende på speciellt byggnadsmaterial, och dels inventera hur läget är inom forskningen i de viktigaste byggnadsmaterialens långtidsdeformationer. Rapporten är till större delen baserad på litteraturstudier.

Med byggnadsmaterial menas de fasta ämnen, som ingår i byggnader. De kan grupperas som visas i schemat nedan. Det är dessa material, som konstruktörerna önskar vetande om och vars egenskaper materialteknikerna skall behärska. - I denna rapport har endast stommaterialen, betong (färsk och hårdnad), gasbetong, trä, stål och aluminium behandlats detaljerat. Tegel och natursten uppvisar ur praktisk synpunkt endast obetydliga tidsberoende deformationer. Plasternas tidsberoende deformationer är betydliga. Det har emellertid varit omöjligt att effektivt bevaka utvecklingen på denna breda front, varför detta ämne endast omtalas ganska kort.

Det härskar stor oklarhet i litteraturen om vilka termer som skall användas för att beskriva tidsberoende deformationer. Man ser ord som

	Byggnadsmaterial
Silikatmaterial	Betong Kalksilikater(gasbetong, kalksandsten) Keramik (tegel) Natursten
Metaller	Stål Aluminiumlegeringar
Organiska material	Trä och träbaserade produkter Syntetiska material (plast, gummi)

plastisk, viskös, försenat elastisk, elastoplastisk och viskoelastisk använda men utan utpräglad konsekvens. I denna rapport har eftersträvats att använda deformationstermer med den innebörd som visas i schemat nedan. Deformationer karakteriseras här med avseende på deras tidsberoende och reversibilitet.

Ordet flytning användes i litteraturen om såväl viskoelastisk som plastisk och viskös deformation. Författaren har eftersträvat att i denna rapport ej använda ordet i samband med fasta material.

Beteckningen viskoelastisk användes av många som gemensam beteckning för försenat elastisk och viskös deformation. - Deformationernas tidsförlopp är mycket varierande. Detta och de olika deformationstypernas kombination omtalas närmare i avsnitt 3.

	Deformationstermer	
	Reversibel	Irreversibel
Momentan	Momentanelastisk	Plastisk
Tidsberoende	Försenat elastisk	Viskös

2. ALLMÄNT OM REOLOGI

2.1. Historik

Fram till begynnelsen av detta sekel togs alla konstruktionsmaterial från naturen och användes antingen direkt, som t ex trä och sten, eller efter en förarbetningsprocess, som hade utvecklats under årtusenden och vars problem man någorlunda behärskade. Man tog materialen med de egenskaper som de råkade ha.

Från sekelskiftet började den moderna kemiska industrin att göra sig gällande med material som gummi, plast, målarfärg, olje- och cellulosaprodukter. Dessa materials deformationsegenskaper kunde ej beskrivas tillfredsställande med den klassiska elasticitets- och plasticitetsteorin. Amerikanska kemister under ledning av professor Bingham utvecklade därför i slutet av 20-talet metoder för beskrivning av dessa ämnens beteende. De kallade denna vetenskapsgren för reologi efter det grekiska ρεω, flyta, och λογοσ, lära. Det blev alltså kemister som i första hand kom att prägla reologin.

Parallellt med utvecklingen inom den kemiska industrin gick en utveckling inom maskin- och byggnadskonstruktionsverksamheten, där man uppmärksammade, att man måste ta hänsyn till konstruktionsmaterialens långtidsdeformationer t ex krypning hos metaller och betong.

De beskrivningsmetoder som utvecklades härför kunde begagnas i kemiindustrin och vice versa. Reologin kom sålunda också att omfatta konstruktionstekniken.

I dag är reologin en tvärvetenskap, som grundar sig på matematik, fysik och kemi och som griper in i bl a hållfasthetslära, byggnadsstatik, geologi, vattenbyggnad, livsmedelsproduktion, plastindustri, färgindustri, massa- och stålproduktion och medicin.

Om reologins historia kan läsas mycket utförligt hos Scott-Blair (49). Han ger bl a en rad citat om reologi från den klassiska grekiska, romerska, arabiska och indiska samt den medeltida europeiska litteraturen.

Detta att sammanföra alla materials deformationsproblem i en vetenskap innebär, att företrädare för helt olika vetenskaps- och industrigrenar ser att de har samma problem och kan gå samman för att lösa dem. Detta gäller i första hand den fenomenologiska beskrivningen av deformationsförloppen. Detta var från början reologins huvudinriktning.

Den andra sidan av reologins problemkomplex är att förklara deformationernas orsaker. Förklaringarna är också besläktade för de olika materialgrupperna såtillvida att atomteorin är den samma för alla material. Det kan vara inspirerande för vetenskapare inom en materialgrupp att se lösningen på ett problem i någon annan materialgrupp. Ofta är emellertid den vetenskapliga nivån inom olika materialgrupper så olika att en inspiration är svår att hämta. Ett exempel är nivåskillnaden mellan metallurgin, där deformationer kan beräknas utifrån dislokationsteorin, och många byggnadsmaterial, där deformationsberäkningar hittills har utförts på ren erfarenhetsbasis.

Forslind (66) påpekar, att reologin i de mest avancerade vetenskapsgrenarna har svängt över från att vara främst beskrivande till att vara främst förklarande. Han ser nu mera den reologiska forskningens huvuduppgift vara att klarlägga samband och skillnader mellan det gasformiga, det flytande och det fasta tillståndets deformationsegenskaper.

2.2. Definition

Reologi betyder, jfr ovan, läran om flytning, vilket har sin historiska bakgrund i att beskrivningen av de nya syntetiska materialens flytegenskaper var reologernas första problem. Efterhand som flera vetenskapsgrenar kom i beröring med reologin blev man tvungen att utvidga definitionen.

En reologidefinition, som kan täcka alla vetenskaper måste emellertid antingen bli oerhört detaljerad eller också mycket intetsägande, jfr den ordagranna översättningen av reologi. I båda fallen har den knappast någon praktisk betydelse. Man ser också, att olika vetenskapare definierar reologi såsom det bäst passar vederbörandes eget ämne:

Reiner (60) anför att reologi är läran om materiens deformation och flytning. Härigenom inkluderar han elasticitetsteori och plasticitetsteori i reologin.

Odqvist (65) anser det emellertid för mest praktiskt att uppfatta reologin som den deformationslära, som ej omfattas av elasticitets- och plasticitetsteori samt hydrodynamik.

E Poulsen (65) som är statiker, säger: "Rheologi er styrke- og deformationsläre under hensyntagen til tidens indflydelse".

Forslind (66), som är fysiker definierar så: "Med reologi menar man numera den disciplin inom naturvetenskaperna, som behandlar materiens irreversibla deformationsegenskaper."

K E C Nielsen (65), som är betongforskare, säger att reologi är ".... den videnskabsgren, som søger at nå frem til en videnskabelig korrekt beskrivelse at materialers formforandringer i tiden, når de udsättes for mekaniske påvirkninger, ... som funktion af materialernes fysisk-kemiske bestanddele og strukturelle opbygning."

Ordet "reologi" förekommer inte alls hos Nadai (63), även om hans bok till hälften behandlar viskositet och plasticitet.

I föreliggande framställning uppfattas reologin som läran om materialens av yttre last orsakade tidsberoende deformationer. Med "läran" förstås såväl den matematiska beskrivningen av fenomenen, som den grundvetenskapliga förklaringen till dem.

2.3. Byggnadsmaterialreologi

Med definitionen ovan har momentandeformationerna och härmed elasticitets- och plasticitetsteori uteslutits från reologin. Dessa teorier behandlas i hållfasthetsläran.

De två sidorna av reologin, den beskrivande och den förklarande, ger sig i byggnadstekniken utslag i att hållfasthetsläran måste ha

ekvationer för materialens långtidsdeformationer, medan byggnadsmaterialläran skall leverera ekvationerna och behärska de ingående koefficienterna. Denna sista uppgift måste lösas med användning av alla grundforskningens discipliner och metoder.

Materialens beteende under framställningen, där de alla utom natursten och trä är flytande behandlas ej under byggnadsmaterialreologin. Ett undantag bildar dock betong, som byggnadstekniken ofta själv producerar. Beskrivningen av den färska betongens egenskaper hör därför traditionellt under byggnadsmaterialläran.

För de fasta materialen är den viktigaste reologiska egenskapen krypning, som är materialens långsamma deformation under påverkan av en yttre last. Dessutom uppträder för de hygroskopiska byggnadsmaterialen långtidsdeformationer under fuktutbyte. De betecknas krympning eller svällning, beroende på deformationens riktning.

Några författare, bl a Reiner, vill utesluta dessa fuktbetingade deformationerna från reologin. Detta är baserat på en uppfattning av krympning och krypning som två skilda fenomen. Föreliggande arbete är delvis influerat av denna traditionella uppfattning. Här behandlas, jfr definitionen i avsnitt 2.2 ovan, de tidsberoende deformationerna till följd av yttre last med eller utan samtidigt fuktutbyte med omgivningen. Vid undersökningens avslutning står det dock klart att man ej i framtiden bör uppfatta krympning och krypning som av varandra oberoende fenomen. Detta visar bl a den nyare trä- och betongforskningen. (Barkas (49), Ruetz (66)).

2.4. Reologilitteratur

Det föreligger en omfattande översiktslitteratur om reologi. De böcker som har betytt mest för kännedomen om reologi inom byggnadstekniken är skrivna av Reiner (60, 60, 54), som själv från början är byggnadstekniker.

I "Lectures on Theoretical Rheology" ger han kort det matematiska verktyget för reologin. Framställningen grundar sig på tensoranalys.

"Deformation, Strain and Flow" visar översiktligt reologins användbarhet. - I "Building Materials" har Reiner redigerat en samling artiklar om byggnadsmaterials deformationsförhållanden. En del av dem är numera något föråldrade.

Scott-Blair (49) har tidigare nämnts. Han behandlar i övrigt mest flytande material, och de psykologiska problem som är knutna till mätningen av deras flytegenskaper.

I Ingeniøren (65) finns nio korta artiklar om reologi på diverse områden.

Finnie och Heller (59) har speciellt behandlat krypning i "engineering materials". Det är dock mest metaller och plast som behandlas.

Eirich (56) har redigerat ett mycket stort verk i tre band om reologins teori och användning. Det kan ej rekommenderas som begynnelseläsning, men väl som handbok för specialproblem. Detsamma gäller de fyra band referat från fjärde kongressen om reologi, redigerade av Lee (65) och Copley (65).

I litteraturlistan har antecknats böcker om reologi i allmänhet och de olika materialens reologi i synnerhet. För överblickens skull har de olika titlarna klassificerats med en enkel bokstavskod.

3. DEFORMATIONSBESKRIVNING

3.1. Översikt, deformationstyper

I detta avsnitt genomgås de termer och matematiska uttryck som används till beskrivning av byggnadsmaterials deformationer, speciellt den s k krypningen.

De tidsberoende deformationernas orsaker, t ex skjuvning i vattenskikt, molekylskjuvning eller dislokationsrörelser, behandlas i samband med de olika materialen i avsnitt 4.

De olika deformationstyper som kort rubricerades i avsnitt 1, skall närmare genomgås nedan. Deformationstyperna i ett material kan illustreras med ett deformationstids-diagram för ett enaxligt belastningsförsök för materialet, t ex som visas på fig 3.1.

Den totala momentana deformationen kan delas i momentanelastisk och plastisk deformation, jfr schemat i avsnitt 1. Storleken av den plastiska deformationen kan endast bestämmas genom omedelbar avlastning.

Den tidsberoende deformationen är sammansatt av en försenat elastisk och en viskös del. Storleksordningen av dessa två kan bestämmas först någon tid efter avlastningen. Termen krypning används om den totala tidsberoende deformationen, försenat elastisk såväl som viskös.

Termen återhämtning används ofta om den försenat elastiska återgången Den bör ej förväxlas med den metallurgiska processen återhämtning, som är ett kristallstrukturfenomen.

För sega material (metaller, trä, plaster) karakteriserar man krypdeformationen med termerna primär, sekundär och tertiär krypning, jfr fig 3.2. I dessa områden är kryphastigheten respektive avtagande, konstant och ökande. För de höga belastningarna, där tertiär krypning uppstår, slutar krypförloppet med brott.

För spröda material (betong, gasbetong) har denna karakterisering ej någon mening. Inte ens för höga belastningar uppstår tertiär krypning innan brott. Kryphastigheten är oftast ständigt avtagande, så att man enligt ovanstående terminologi måste kalla krypningen primär.

3.2. Idealmaterial

I den allmänna framställningen av hållfasthetsläran arbetar man med några materialidealiseringar, hypotetiska material, som kort skall genomgås nedan. För en mera ingående behandling hänvisas till hållfasthetslärböcker, t ex Hult (66) och Poulsen (65).

Man illustrerar de hypotetiska materialens beteende med deras reaktion på en enaxlig påverkan. De material, vars deformationer är oberoende av tiden, karakteriseras sålunda genom ett arbetsdiagram, en $\sigma - \varepsilon$ - kurva medan de tidsberoende materialen måste karakteriseras med såväl ett tidsspännings- som ett tids-töjningsdiagram. Sådana diagram ses i schema 1. Materialen i schemat skall kort kommenteras.

Det stela materialet har ingen motsvarighet i naturen, men är ändå ofta en praktisk idealisering, speciellt i samband med det plastiska materialet.

De elastiska materialens deformationer är helt reversibla. Vidare karakteriseras de av att sambandet mellan σ och ε är det samma vid avlastning som vid pålastning. Det viktigaste av de elastiska materialen är det linjärelastiska. Det karakteriseras av den ekvation, som hela den klassiska elasticitetsteorien är uppbyggd på, nämligen Hookes lag $\sigma = E \cdot \varepsilon$, där man har linjärt samband mellan spänning och töjning. De ickelinjärelastiska materialen kan delas i hårt elastiska material, där arbetslinjen kröker uppåt, och mjukt elastiska material, där arbetslinjen kröker nedåt.

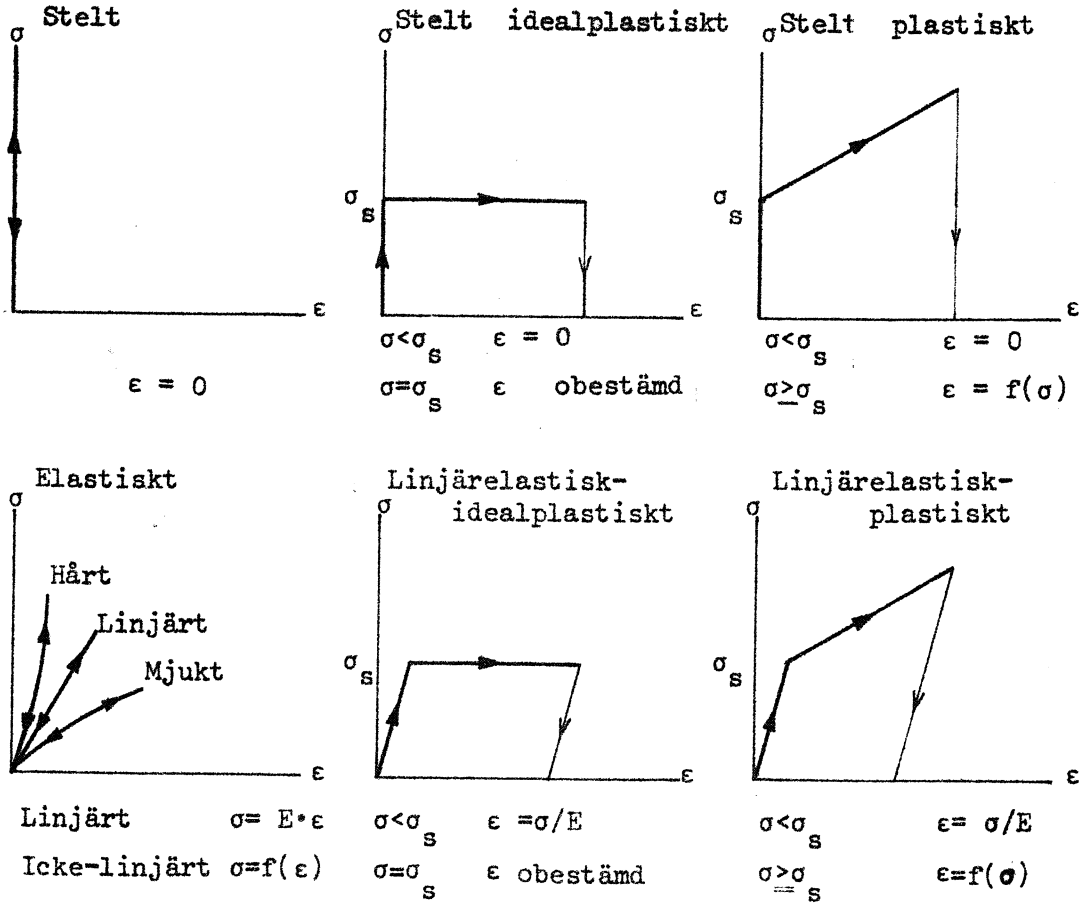
Ett material som uppvisar plastiskt beteende karakteriseras av, att en mycket snabb deformation börjar, när spänningen kommer över ett visst tröskelvärde, sträckgränsen. Deformationen går så fort, att det för den vanliga konstruktionspraktiken är korrekt att kalla den momentan. Om deformationen försiggår utan spänningsökning kallas materialet

SCHEMA 1. MATERIALIDEALISERINGAR

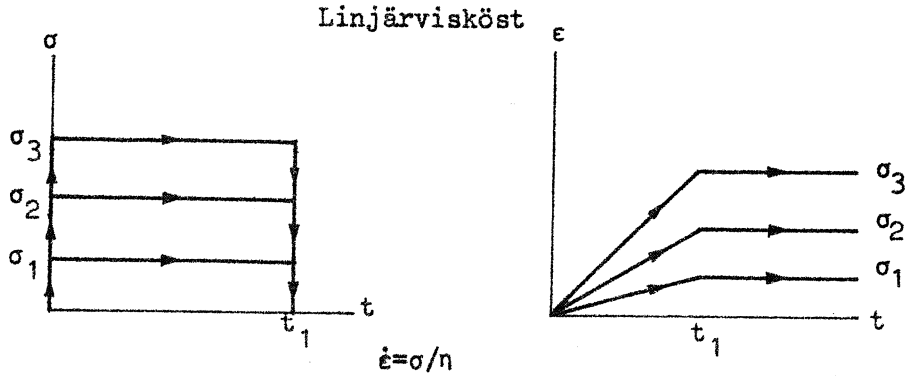
Karakterisering genom enaxligt dragförsök

På- och avlastning symboliserad med pilar

Tidsoberoende



Tidsberoende



idealplastiskt. Om spänningen måste ökas för att öka deformationen kallas det blott plastiskt. De plastiska deformationerna är irreversibla. För karakterisering av förhållandena under sträckgränsen kombineras det plastiska beteendet med något av de ovan nämnda, reversibla beteendena. Man får då t ex det stela, idealplastiska materialet, (som bildar utgångspunkt för plasticitetsteorin) det linjärelastisk-idealplastiska materialet, det stela plastiska och det linjärelastiskplastiska materialet.

Det enklaste tidsberoende materialet är det linjärviskösa materialet. Det karakteriseras av att deformationshastigheten är linjärt beroende av spänningen. I analogi med förhållandena i en newtonsk vätska karakteriserar man sambandet mellan deformationshastigheten $\dot{\varepsilon}$ och spänningen σ, med formeln $\dot{\varepsilon} = \sigma/\eta$. η är en materialkonstant som betecknas viskositetskoefficienten. De viskösa material som icke karakteriseras av denna enkla ekvation betecknas ickelinjärviskösa. Viskösa deformationer är irreversibla.

De övriga tidsberoende materialidealiseringarna karakteriseras som kombinationer av de ovan beskrivna tidsberoende och tidsoberoende materialen. De som kombineras av viskösa och elastiska material betecknas viskoelastiska.

Som exempel skall anföras att de linjärelastisk-plastiska materialen närmast motsvaras av metaller, de viskoelastiska av plaster, gummi, glas och betong och de elastiska av material bestående av kristaller med jonbindning eller kovalent bindning. Det linjärelastisk-idealplastiska materialet har sin motsvarighet i vanligt kolstål.

3.3. Reologiska modeller

För att beskriva de tidsberoende deformationerna kan man använda de s k reologiska modellerna. Med en reologisk modell av ett material menas ett mekaniskt system, för vilket sambandet mellan tid, kraft och deformation är analogt med sambandet mellan tid, spänning och töjning hos materialet i fråga.

De reologiska modellerna är oftast sammansatta av linjärelastiska fjädrar, linjärviskösa stötdämpare och friktionskopplingar anbragta parallellt eller i serie. (Några författare har även använt olinjärt elastiska fjädrar). I schema 2 visas de reologiska modellernas grundelement jämte några sammansatta modeller. För de tidsoberoende har arbetskurvan och för de tidsberoende krypkurvan ritats.

För grundelementen gäller att fjädern är modell för det linjärelastiska, stötdämparen för det linjärviskösa och friktionskopplingen för det stela, idealplastiska materialet.

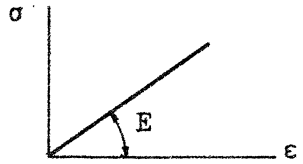
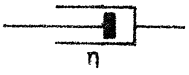
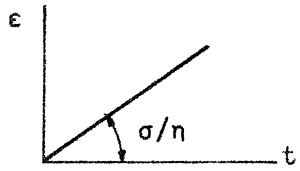
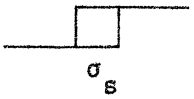
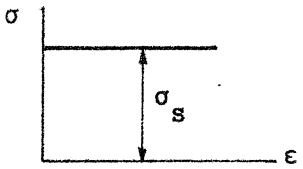
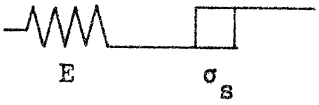
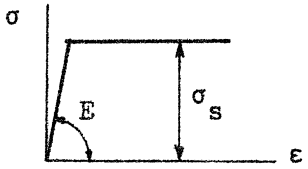
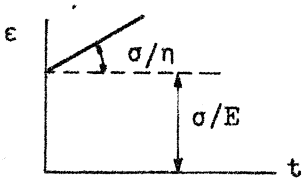
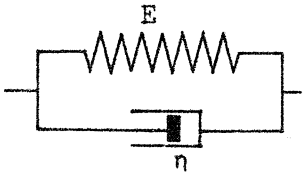
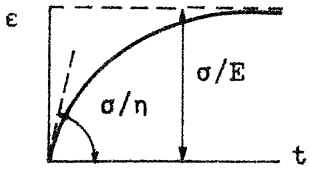
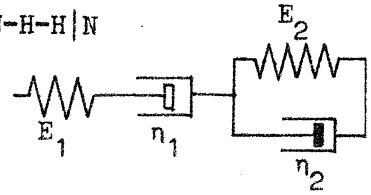
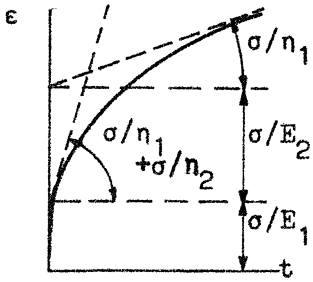
De reologiska modellerna lanserades i reologins barndom av forskare som Reiner, Bingham och Scott Blair. Det var deras förhoppning, att man genom att införa detta modelltänkande kunde standardisera termerna för materialens deformationsbeteende. Reiner (58) föreslog att man skulle använda termerna Hooke-elasticitet, Kelvin-elasticitet, Burgers-elasticitet osv i stället för det obestämda visko-elasticitet.

Man införde kodbeteckningar på modellerna. Modellbeteckningens förbokstav användes som kod och strecken | eller - angav om elementen skulle i parallell- eller seriekoppling. I schema 2 visas några kodbeteckningar. Maxwellmodellen symboliseras M = H - N och Kelvinmodellen K = H|N. Elementkombinationerna blev namngivna efter deras uppställare eller efter andra framstående forskare. (Infört första gången av von Mises 1930.) Förutom Hooke, Newton, St Venant, Maxwell och Kelvin hedrades t ex Jeffreys (J = N|M), Lethersich (L = K - N), Burgers (B = L - H = (H|N) - N - H) och Schwedorf (Schw = H - (StV|M)). (Detta system förefaller dock att ta större hänsyn till forskarnas hedrande än till existerande material.)

För varje reologisk modell kan uppsättas en differentialekvation innehållande spänningar, töjningar, dessas tidsderivata och modellkoefficienter dvs materialkonstanter. Denna differentialekvation kan lösas utifrån olika randbetingelser.

Så blir t ex lösningen för konstanthållen spänning en krypekvation och för konstanthållen töjning en relaxationsekvation. Nadai (63) använder

SCHEMA 2. NÅGRA REOLOGISKA MODELLER

Namn	Kod	Modell	Karakteristisk kurva
Hooke	H		
Newton	N		
St. Venant	StV		
Poynting	P= H-StV		
Maxwell	M= H-N		
Kelvin	K= H|N		
Burgers	B= N-H-H|N		

detta betraktningssätt. Nedan anges differentialekvationerna för de oftast förekommande modellerna, jämnte lösningen för konstant spänning, dvs krypekvationen. t anger tiden. Konstanternas betydelse framgår av schema 2.

Newton:

$$\dot{\varepsilon} = \sigma/\eta \,, \qquad \varepsilon_c = \sigma t/\eta.$$

Maxwell:

$$\dot{\varepsilon} = \sigma/E + \dot{\sigma}/\eta \,, \qquad \varepsilon_c = \sigma/E + \sigma t/\eta.$$

Kelvin:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon + \eta\, \dot{\varepsilon} \,, \qquad \varepsilon_c = \sigma(1-\exp(-Et/\eta))/E.$$

Burgers:

$$\sigma + \left(\frac{\eta_1}{E_1} + \frac{\eta_1}{E_2} + \frac{\eta_2}{E_2}\right)\dot{\sigma} + \frac{\eta_2}{E_2}\frac{\eta_1}{E_1}\ddot{\sigma} = \eta_1\left(\dot{\varepsilon} + \frac{\eta_2}{E_2}\ddot{\varepsilon}\right),$$

$$\varepsilon_c = \sigma/E_1 + \sigma t/\eta_1 + \sigma(1-\exp(E_2 t/\eta_2))/E.$$

Man måste konstatera, att de reologiska föregångarnas förhoppningar om en terminologistandardisering ej gick i uppfyllelse. Orsakerna till detta är dels, att den ekvation, som en modell representerar nästan aldrig är den enklaste matematiska beskrivningen av ett utfört försök och dels att dessa modeller ej är grundade på egenskaper hos materialets verkliga struktur.

Den bristande strukturanknytningen har orsakat mycken kritik av modellerna (Barkas (49), Kauman (66), Ruetz (66)), och detta förhållande skall också uppmärksammas här. Man kan eventuellt hämta inspiration till att uppställa en modell genom att betrakta materialstrukturen (Reiner (58), Kollman (61), men man kan icke slutta sig till någonting om materialstrukturen utifrån ett ekvationssystem, som råkar ha en mekanisk analogi.

En reologisk modell kan simuleras med ett elektriskt system, där strömstyrkan representerar den mekaniska spänningen och den elektriska spänningen deformationen. En fjäder motsvaras av ett ohmskt motstånd och en stötdämpare av en kondensator. (Glube (67)).

3.4. Krypningens tidsberoende

De fasta materialens komplicerade struktur orsakar, att det tyvärr ytterst sällan är möjligt att beskriva de tidsberoende deformationerna med de ekvationstyper som härleds av de reologiska modellerna. T ex kan ett fenomen som deformationshårdnande hos metaller svårligen illustreras på detta vis. Nedan skall beskrivas de viktigaste av andra matematiska uttryck, som används i litteraturen för att beskriva krypningen.

Krypningen är en funktion av tid, spänning och temperatur, $\varepsilon_c = f(t, \sigma, T)$. De uttryck som behandlas i denna rapport kan skrivas som en produkt av två av varandra oberoende funktioner

$$\varepsilon_c = f(t) \cdot g(\sigma, T). \tag{3.1}$$

Antalet empiriska uttryck är stort. Enligt Bhattacharya et al (52) föreligger mer än 30 för metaller och Wagner (58) anger ett tiotal för betong.

Vilken funktion som skall väljas för att beskriva ett givet krypförlopp bör främst bestämmas av att kurvpassningen blir så god som möjligt. För dem som använder uttrycket är formen egal. Men om man kan välja mellan olika kryputtryck kan man ta hänsyn till att exponentialuttryck ingår i de reologiska modellerna, som har funnit viss tillämpning inom den teoretiska hållfasthetsläran, jfr avsnitt 3.3.

I tabell 1 redovisas ett antal empiriska kryputtryck för primär och eventuellt sekundär krypning. Andrades uttryck har medtagits mest av historiska orsaker. Det var länge det mest använda uttrycket för metaller. - Det framgår av schemat att uttryck med tiden i en potens har funnit stor utbredning. Potensen är oftast av storleksordningen 0.1 - 0.5. För sekundär krypning i metaller och plast kommer den upp på 1, dvs krypningen blir proportionell mot tiden.

Tabell 1 är i övrigt en sammanfattning av kryputtrycken i avsnitt 4. Ekvationerna avser endast små töjningar, dvs töjningar av den storleksordning som är vanlig vid beräkning av byggnadskonstruktioner.

Av tabell 1 ses att det endast är ekvationstyp V, Ross' och Lormann's hyperbeluttryck, där ett asymptotiskt slutvärde förekommer. Alla de andra ekvationerna visar mot att krypningen fortsätter i oändligheten. Av de försök, som kan beskrivas med ekvationstyp V är det ytterst få, där man kan påvisa ett slutvärde inom försökstiden.

3.5. Krypningens spännings- och temperaturberoende

Deriveras ekv (3.1) m a p tiden fås ett uttryck för kryphastigheten $\dot{\varepsilon}$, där $g(\sigma, T)$ ingår. Denna kryphastighet skall behandlas nedan för konstant tid.

Vanligtvis är kryphastigheten hos byggnadsmaterial under en viss spänningsgräns linjärt beroende av spänningen. Man får

$$\dot{\varepsilon}_c = A \cdot \sigma \tag{3.2}$$

Ekvationen för de reologiska modellerna förutsättes i allmänhet att följa denna ekvation. Regeln innebär att kryptöjningar från olika spänningspåkänningar kan superponeras. Detta kallas Boltzmanns superpositionsprincip. Det har påvisats vid åtskilliga försök att superpositionsprincipen kan tillämpas på de flesta byggnadsmaterial. Om man speciellt beaktar den noggrannhet med vilken krypegenskaperna i de flesta fall kan bestämmas blir denna princip i de flesta fall absolut försvarbar. Detta medför en stor förenkling av beräkningarna jämfört med beräkningar på basis av icke-linjära uttryck. Boltzmanns superpositionsprincip har enligt Paulsen (65) bl a eftervisats för betong av Mc Henry, för polymerer av Leadermann och Alfrey och för vissa metaller av Zemer och Nowick.

För stållegeringar uppställde Norton 1929 uttrycket.

$$\dot{\varepsilon}_c = B \cdot \sigma^n. \tag{3.3}$$

Detta uttryck har sedan vunnit stor utbredning för metaller, spec i temperaturområdet 0.4 till 0.7 gånger den absoluta smälttemperaturen. Det kan också användas för vissa plaster. Det är empiriskt och är

fortfarande på grund av sin användbarhet i bruk, även om ekv (3.4) nedan har visats vara teoretiskt riktigare. - Potensen n är beroende av strukturen. (Finnie och Heller (59) anger att man kan antaga n = 1 i finkorniga, polykristallina, keramiska material. Potensen växer med kornstorleken. Resonemanget bygger på försök med Al_2O_3 vid 1400 - 1800°C.)

För ett material, som förutsättes bestå av diskreta partiklar har bl a Freudenthal (50) med termodynamisk sannolikhetskalkyl visat att kryphastigheten följer en ekvation av formen

$$\dot{\varepsilon}_c = \text{konst} \cdot \frac{k \cdot T}{h} \cdot e^{-Q/RT} \sinh (q/RT). \qquad (3.4)$$

Här är

k Boltzmanns konstant,
T den absoluta temperaturen,
h Planck's konstant,
R gaskonstanten,
Q aktiveringsenergin för ett mol, och
q energin av yttre kraften per mol

För praktisk användning vid anpassning till försöksresultat skrivs ekv (3.4) emedan q är proportionell mot spänningen σ,

$$\dot{\varepsilon}_c = K_1 \sinh (K_2\sigma) \qquad (3.5)$$

där K_1 och K_2 är försöksparametrar. Denna ekvation har enligt Thorkildsen (64) visats gälla för metaller av bl a Kauzmann, 1941 och för linne, termoplaster, asbest och glasfiberarmerad plast av Findley o a 1951. Wittmann (66) har använt den för cementpasta. Ekv (3.5) blev tidigare uppsatt av Nadai på empirisk basis.

Om den yttre kraftens potentiella energi q är liten jämförd med värmeenergin RT (som bestämmer atomrörelsen) sålunda att (q/RT) är liten kan ekv (3.4) approximeras med

$$\dot{\varepsilon}_c = \text{konst} \cdot q \cdot e^{-Q/RT}. \qquad (3.6)$$

Ekv (3.6) kan transformeras till

$$\sigma = \dot{\varepsilon} \cdot K \cdot e^{Q/RT} = \dot{\varepsilon} \cdot \eta \qquad (3.7)$$

som är ekvationen för en viskös deformation.

Viskositetskoefficienten η uttrycker motståndet mot deformationen. Enligt (3.7) bör det för konstant spänning existera ett linjärt samband mellan log η och 1/T. Enligt Freudenthal har ett sådant samband påvisats.

Om den yttre kraftens energi q är stor i förhållande till RT kan funktionen sinh(q/RT) ersättas av $(1/2)e^{q/RT}$. Ekv (3.4) får då formen

$$\dot{\varepsilon} = \text{konst}\ \frac{kT}{h}\ e^{-Q/RT} \cdot e^{q/RT}. \qquad (3.8)$$

Denna ekvation definierar enligt Freudenthal plasticitet. Inflytandet av värmeenergin är liten. Den yttre kraften har stor betydelse.

Enligt Freudenthals härledning ovan kan viskositet och plasticitet sålunda betraktas som gränsfall av ett allmänt beteende bestämt av ekv (3.4).

3.6. Krypning och relaxation

Krypning, dvs ökande deformation vid konstant spänning, och relaxation, dvs minskande spänning vid konstant deformation, är två sidor av samma sak, materialens viskoelasticitet. Oftast utförs krypförsök, sällan relaxationsförsök och nästan aldrig båda två. Det kan därför bli nödvändigt att beräkna relaxationsegenskaper från krypförsök och omvänt.

Hansen (64) anger en metod för detta. Under förutsättning av att Boltzmanns superpositionsprincip kan användas och att kryptöjningarna är små jämfört med de elastiska töjningarna kan ekvation (3.9) och (3.10) användas till beräkning av relaxationsspänningar från kryptöjningar och omvänt.

$$\sigma_t = \frac{2\varepsilon_e - \varepsilon_{ct}}{2\varepsilon_e + \varepsilon_{c1}} \sigma_o . \tag{3.9}$$

$$\varepsilon_{ct} = \frac{2(\sigma_o - \sigma_t)}{\sigma_1 + \sigma_o} \varepsilon_e . \tag{3.10}$$

Här är

σ_t relaxationsspänningen vid tiden t,
ε_{ct} kryptöjningen vid tiden t,
σ_o den konstanta spänningen under krypningen,
ε_e den momentana töjningen för spänningen σ_o.

Hansen har kontrollerat ekv (3.9) på resultat från kryp- och relaxationsförsök på bl a förspänningsstål, polymetylmetakrylat och polystyren.

3.7. Krypmått

Materialens krypbenägenhet uttrycks ofta praktiskt med ett enkelt spännings- eller deformationstal. Bl a kommer följande krypmått till användning.

Beteckningen krypgräns användes tidigare om den spänning under vilken krypning ej uppstår. Man lär emellertid med noggranna mätningar kunna påvisa krypning i alla material vid alla spänningar. Numera definierar man krypgränsen eller mera korrekt krypsträckgränsen som den spänning som ger en bestämd töjning efter en bestämd tid. Detta mått användes mest i samband med metaller, med 0.2 % och 1000 h som referensvärden. Krypsträckgränsen betecknas då $\sigma_{0.2/1000}$.

Varaktighetsgränsen (långtidshållfastheten) är den spänning som pålagd i obegränsad tid ej ger brott. Detta mått säger ej någonting om krypningens storlek.

Slutkrypningen, $\varepsilon_{c\infty}$, är den töjning som uppkommer i materialet efter oändligt lång tid. Detta mått användes mest för betong. (Wagner (58)).

För material där Boltzmanns superpositionsprincip kan användas kan krypningen anges som specifik krypning, dvs krypningen per belastningsenhet, ε_c^1. För material där ett slutkrypmått kan definieras anges speciellt den specifika slutkrypningen, $\varepsilon_{c\infty}^1$.

Kryptalet, ϕ, är kryptöjningen dividerad med den momentana töjningen. Det är sålunda en funktion av tiden. För betong användes ofta kryptalet efter oändlig tid. Detta mått är definierat som slutkrypningen, $\varepsilon_{c\infty}$, genom antingen den förväntade momentantöjningen efter oändlig tid (ϕ_∞) eller genom momentantöjningen vid 28 dygns ålder. Detta sista mått $\phi_{28\infty}$, är det vanligaste (Wagner (58)).

Eftersom ca 3/4 av krypningen hos de flesta material har utspelats efter ett år, används ofta kryptalet efter denna tid, $\phi_{1\text{år}}$, som krypmått. I tabell 2 finns anfört exempel på $\phi_{1\text{år}}$ för några byggnadsmaterial.

Vid redovisning av försöksresultat har användning av kryptalet den fördelen att mätfel som ingår i såväl den momentana som den tidsberoende deformationen kan elimineras.

3.8. Krypning och krympning, dimensionsberoende

Som nämnts i avsnitt 2.1.3 är de fuktbetingade deformationerna en väsentlig del av byggnadsmaterialreologin. Krypning under samtidigt fuktutbyte med omgivningarna kan uppgå till 2 à 3 gånger den krypning som uppkommer utan fuktutbyte.

Tidigare ansåg man (bl a inom betongforskningen) att krypning och krympning var av varandra oberoende fenomen. Kryprесultatet blev bestämt som den totala långtidsdeformationen minus krympningen hos ett kontrollprov. Detta förfarandets riktighet måste emellertid ifrågasättas, jfr avsnitt 4.2.2.

För hygroskopiska materials krypning införes termerna grundkrypning (eng: basic creep) och sorptionskrypning, för krypning utan respektive med fuktutbyte med omgivningen. Sorptionskrypning kan antingen vara absorptions- eller desorptionskrypning. (Enligt Powers och Brownyard (48),

är begreppet sorption överordnat absorption = fuktupptagning, och desorption = fuktavgivning).

Förloppet av sorptionskrypning beror på fuktförhållanden kring konstruktionen eller provet i fråga och, mycket viktigt, på kroppens storlek och utformning.

Variationer i den omgivande luftens fukthalt har särskilt stor betydelse för träs krypning. Fig 3.3 visar hur en cyklisk variation av relativa luftfuktigheten mellan 70 % rf och 25 % rf kan öka kryptalet till det tredubbla av vad som erhålles vid konstant luftfuktighet på 70 % rf. Försöken är utförda på extremt tunna provkroppar (0.4 mm). Effekten blir troligen mindre utpräglad vid grövre dimensioner.

Betydelsen av provkroppens form framgår av försök av Hansen och Mattock (66). Fig 3.4 visar kryptalet för betongprismor med olika förhållande mellan volym och yta. Provkropparna var lagrade i 100 % rf och belastade vid 8 dygns ålder i ett klimat med 50 % rf. Man ser att uttorkningen har störst betydelse för de minsta provkropparna med de små volym-yta-förhållandena. Vid de högre förhållandena går krypningen långsammare och tenderar mot värden närmare grundkrypningen, dvs uttorkningen får mindre betydelse. Betongs sorptionskrypning behandlas mera i avsnitt 4.2.2.

Enligt ovanstående är det endast i samband med sorption som man kan tala om ett dimensionsberoende hos krypningen. - Nyligen har dock Wittman och Klug (68) framlagt en teori för krypning i cementpasta enligt vilken tidsförloppet för grundkrypningen skulle vara beroende av provkroppens höjd. Teorin har ej verifierats ännu.

3.9. Tixotropi

Tixotropi är ett begrepp som hör till reologi för de flytande materialen. Det är knutet till flerfassystem, där en fas är vätska. Det innebär att systemet i fråga har förmåga att byta tillståndsform från fast till flytande och till fast igen. Under en bestämd skjuvspänning är systemet fast och elastiskt, därför att det finns kemiska bindningar

mellan de fasta partiklarna. Över denna skjuvspänning, som ofta kallas flytgränsen, bryts de kemiska bindningarna och systemet beter sig som en vanlig suspension med viskösa egenskaper. Upphör skjuvspänningen att verka kommer de kemiska bindningarna att efterhand åter etableras och materialet blir fast igen.

Färsk betong och gélefärg är tixotropa. Slam av en speciell lerart (Bentonit) kan användas till gropstabilisering under utgrävning på grund av att det är tixotropt.

4. MATERIAL

4.1. Beskrivningens omfattning

I detta avsnitt ges en framställning av hur läget är inom forskningen rörande de viktigare byggnadsmaterialens reologiska beteende. I relation till den stora mängden litteratur som finns om detta ämne kan framställningen endast bli mycket summarisk.

Vid redogörelsen för de enstaka materialen anförs först vad man inom vederbörande materialgrupp anser (eller borde anse) som materialets reologiska egenskaper, och viktiga böcker på området omtalas. Därnäst behandlas orsakerna till de tidsberoende deformationerna och de metoder som används för att beskriva dem.

Beskrivningen omfattar förhållanden i enaxligt spänningstillstånd, därför att de flesta arbeten som för närvarande föreligger behandlar detta. Brottfenomen har i allmänhet ej medtagits.

Beskrivningen av de tidsberoende deformationerna har ej kunnat göras i alla detaljer, varför denna rapport ej gör anspråk på fullständighet. För mera uttömmande beskrivning hänvisas till de specialverk som redovisas under varje avsnitt. - För jämförelsens skull har i tabell 2 angetts ett antal exempel på kryptal för olika materialgrupper.

4.2. Hårdnad betong

4.2.1. Begrepp, litteratur

Med den hårdnade betongens reologiska egenskaper menas oftast endast krypning och krympning.

Krypning hos betong omtalas första gången i litteraturen av Woolson 1905 (enligt Wagner (58)). Sedan dess har litteraturen om detta ämne ständigt ökat. 1958 gjorde Wagner en hittills oöverträffad genomgång och bearbetning av 213 litteraturkällor. 1964 kunde Cement & Concrete Association ge ut en litteraturförteckning på över 800 titlar om krypning och krympning. Litteraturen härom växer ständigt, därför att dessa

ämnen bl a till följd av betongvariablernas mångfald alltjämt är ofullständigt kända. - Newmann (66) har gett en utmärkt revy över betongens egenskaper, bl a i flera axligt spänningstillstånd. Newmanns artikel är antagligen den mest aktuella översikten. En metod för tredimensionell beräkning av betongkonstruktioners tidsberoende deformationer har framlagts av L F Nielsen (66).

Krympning behandlas av bl a l'Hermite (47) (59) och Neville (61). En litteraturgenomgång har gjorts av Ahlgren (67). Nedan behandlas mest krypning.

4.2.2. Orsaker till krypning

Under tidens lopp har många spekulationer över orsakerna till betongens krypning och krympning gjorts (Wagner (58), Neville (61), Hansen (60) Powers (66)). Den av Ruetz (66) framlagda hypotesen förefaller för närvarande vara den mest användbara. Han har utfört omfattande fysikaliska försök som styrker hypotesen.

Den bygger på studier av betongens mikrostruktur av bl a Grudemo (59).

Ruetz menar att krypningen primärt äger rum som dislokationsrörelser i vattenskikten mellan cementgelpartiklarna. En reduktion av dessa vattenskikt genom uttorkning eller genom hydratation utan vattentillgång nedsätter den tidsberoende deformationsbenägenheten väsentligt.

Krympning antages vara orsakad av de stora krafter som bildas, när vattnet försvinner från gelporerna i cementpastan.

Sorptionens inverkan på krypningen förklaras på följande vis. Vattnet mellan gelpartiklarna är ej flytande utan besitter en viss närordning. En avgång eller tillförsel av vatten bildar och utlöser en mängd dislokationer, som rör sig genom vattenskiktet och på detta vis ökar töjbarheten. Samtidigt bildas nya platser i strukturen, där deformation kan äga rum. Detta förklarar varför betongs krypning ökar under såväl absorption som desorption.

Ruetz hypotes illustreras av fig 4.1. Abskissan anger vattenförlust i

% av mängden blandningsvatten. Ordinatan anger krypning i relation till krypningen hos ett förseglat, vått prov. Övre kurvgrenen anger krypning under uttorkning till de på abskissan angivna fuktkvoterna dvs sorptionskrypning. Nedre kurvgrenen anger krypning vid pålastning efter uttorkning till de samma fuktkvoterna, dvs grundkrypning.

Ruetz hypotes bekräftas också av försök av Mullen (66) som visar att alldeles torr cementpasta inte kryper. Ruetz' arbete på det grundvetenskapliga planet har följts upp av bl a Wittmann (66) och (67). Hansen (68) angriper också problemet på detta plan.

Ovanstående hypotes avser betong vid måttliga belastningar. Över ca 50 % av brottspänningen kompliceras fenomenen av mikrosprickbildning (Hansen (60)). Dessa 50 % är också gränsen för användning av Boltzmanns superpositionsprincip. Betongs beteende vid högre belastningar förefaller i övrigt vara måttligt behandlad i litteraturen. Wagner refererar enstaka försök.

Ruetz' arbete avser den submikroskopiska strukturen. Makroskopiskt har man genom åren konstaterat att krypningens storleksordning är influerad av i stort sett alla betongteknologiska faktorer. De viktigaste av dessa visas i schemat nedan.

Faktorer, som influerar betongs krypning	
Inre faktorer	Yttre faktorer
Cementkvalitet	Belastningsstorlek
Vattencementtal	Belastningsart
Cementpastahalt	Temperatur
Ballastens mekaniska egenskaper	
Ballastens permeabilitet	Vid sorption:
Tillsatsmedel	Luftfuktighet
Bearbetning	Kroppens utformning
Hydratationsgrad	Karbonatisering

4.2.3. Krypningsbeskrivning

Grundkrypningen har behandlats av Hansen (60). Han anger följande formel för grundkrypningen hos betong ooch cementpasta upp till 1000 dygn, efter vilken tid det mesta av krypningen anses vara utspelad.

$$\varepsilon_c = \sigma \cdot k_1 \left(0.5 + 1.65 \frac{vct}{g(t_o)}\right) V \left(1 - e^{-k_2(t_1 - t_o)}\right)$$

$$+ k_3 \cdot vct \cdot V \ln (t_1/t_o) \qquad (4.1)$$

Här är

vct vattencementtalet,

V volymandelen cementpasta,

t_o betongens ålder vid pålastning (dygn),

$g(t_o)$ cementet hydratationsgrad vid t_o,

t_1 betongens ålder vid tiden då krypningen önskas bestämd (dygn),

k_1, k_2 och k_3 konstanter beroende på cementgelens deformationsegenskaper:

$$k_1 = 3.06 \cdot 10^{-6}, \; k_2 = 0.0333, \; k_3 = 5.7 \cdot 10^{-6}.$$

Ekv(4.1) är uppställd på grundval av antagandet att betong är ett modificerat Burgers material. Koefficienterna är avpassade till ett stort antal försöksresultat från litteraturen.

Hansens framställning är begränsad till grundkrypning. För sorptionskrypning måste andra metoder användas t ex Wagners. L F Nielsen (68) anger även en formel för skattning av grundkrypningen.

Wagner (58) har som tidigare nämnts gjort en sammanställning över de flesta av de 1958 kända försöken. Han kommer fram till att det under tidens lopp har utvecklats ett tiotal olika typer av funktionsuttryck för krypningens tidsberoende. Ett par av uttrycken har återgivits i tabell 1. Wagner visar med ett exempel, återgivet i fig 4.2, hur sex av förslagen lämpar sig för beskrivning av ett krypförsök utfört av Glanville.

Det bäst anpassningsbara av uttrycken är den av Thomas angivna exponentialfunktionen med varierande exponent

$$\varepsilon_c = \sigma\, \varepsilon^1_{c\infty}\, (1 - e^{-f(t)}) \qquad (4.2)$$

Uttrycket kan dock vara något besvärligt att använda i praktiken.

De enklaste uttrycken att använda är de hyperbolska formlerna, angivna av Ross och Lorman.

$$\text{Ross:} \quad \varepsilon_c = t/\,(a + bt) \qquad (4.3)$$

$$\text{Lorman:} \quad \varepsilon_c = \sigma\, \varepsilon^1_{c\infty} \cdot t/\,(n + t) \qquad (4.4)$$

Ekv (4.4), som endast är en omformning av ekv (4.3), är den mest överskådliga. n anger den tidpunkt, där halvparten av krypningen har ägt rum. Båda ekvationerna går asymptotiskt mot slutkrypningen.

Wagner konstaterar efter sin undersökning av tidsförloppen, att betong tyvärr ej gör oss den tjänsten att krypa efter en enkel och entydig matematisk funktion.

Det påstås ofta, att betong fungerar som ett Burgers material (jfr avsnitt 3.3). Författaren har dock ej i litteraturen sett någon Burgers ekvation med konstanta koefficienter för betong.

Som resultat av Wagners undersökning föreligger en metod till skattning av betongens slutkrypning. Han har genom sitt arbete konstaterat att nästan alla försöksresultat med tillräcklig noggrannhet låter sig beskrivas med ekv (4.3). Han bestämmer då asymptoten, slutkrypvärdet, för alla försöken och anger i diagramform hur detta värde influeras av cementtyp, härdningsgrad vid pålastning, vattencementtal, cementpastahalt, relativ luftfuktighet, ballasttyp och provkroppsstorlek.

Det ligger i sakens natur, att en sådan metod måste bli mycket osäker. Wagner anser själv att man måste räkna med avvikelser från det erhållna värdet på $\pm$ 20 %.

Metoden korrigerar rätt onyanserat för ballastmaterialen och för provkroppsstorleken och tar inte hänsyn till temperatur och temperatursvängningar. Från litteraturen efter 1958 bör det dock kunna utvärderas nya korrektioner för dessa saker (bl a enligt Hansen & Mattock (66)). Metoden är rent empirisk, men det finns i dag inga andra möjligheter till att utvärdera betongens sorptionskrypning. Det torde dröja långt in i framtiden innan den grundvetenskapliga metoden kan leverera resultat så att betongens krypning kan förutberäknas med mera exakta metoder.

Wagners metoder återges av bl a Bergström (67), Bergström och Warris (68), Pettersson (66) och Neville och Meyers (64). Neville och Meyers anger i samma publikation en liknande metod av Jones, Hirsch och Stephensen. CEB (64) anger en metod till bedömning av krypning, som också i stort sett bygger på Wagners resultat. CEB anger även en metod för bedömning av krympningen. Utvärdering av krympningens storlek kan också göras med ledning av en artikel av Bergström (67).

4.2.4. Porballastbetong

Porballastbetong har under senare år funnit allt större användning som konstruktionsmaterial. Dess deformationsegenskaper, speciellt krypning och krympning, har därvid fått särskild aktualitet. Litteraturöversikter över detta ämne har gjorts av Walz och Wischers (64) och Kruml (68).

I porballastbetong får ballastmaterialens mekaniska egenskaper och vattengenomsläpplighet större betydelse för betongens deformationer än i vanlig betong. Reichard (64) har utfört ett stort försök med dessa betongtyper. Han fann i de flesta fall att krypning och krympning var större än för vanlig betong. Detta framgår också av Kruml's översikt, men ej generellt. Kryptalet är störst för sorptionskrypning och av samma storleksordning som vanlig betong för grundkrypning.

Kruml anger att gränsen för proportionalitet mellan krypning och spänning ligger så högt som vid 70 % av brottgränsen.

I tabell 2 anges några kryptal för porballastbetong enligt Kruml (68).

4.3. Gasbetong

Med högtrycksånghärdad gasbetongs reologiska egenskaper menas i allmänhet, liksom för betong, krympning och krypning. Krympningen har tidigare studerats ingående av Ottoson (63) och Statens Betongkommitté (64).

Krypning hos gasbetong har ej studerats i någon större omfattning. De undersökningar som föreligger är alla gjorda på armerade konstruktionselement. Den största undersökningen har gjorts av Schäffler (60). I Sverige har Nylander och Sahlin (58) och Ödegård (60) utfört motsvarande prov på element av en svensk produkt. Statens Betongkommitté gjorde även en inventering av litteraturen om krypning. Denna klargjorde att de olika försöken visade mycket stor spridning och inte gav upplysningar om storleksordningen av krypningen i själva gasbetongmaterialet.

Föranlett av den blygsamma kännedomen om krypningen igångsattes 1965 försök med oarmerat material vid Tekniska Högskolan i Lund. Resultatet av den första delen av undersökningen föreligger nu (Nielsen (68)). Tidsförloppet hos krypningen kunde på basis av de tidigare och de egna försöken visas följa en potensfunktion av tiden. Försöken har utförts som böjförsök på oarmerade balkar. Detta betyder att man har fått en samverkan av drag- och tryckkrypning. Belastningen på balkarna var ganska låg (2 och 4 kp/cm^2) på grund av materialets ringa draghållfasthet. M a p användningen i praktiken vore det önskvärt om storleken av tryckkrypningen under aktuella bruksbelastningar blev utvärderad.

I tabell 2 har redovisats några kryptal från Schäfflers och egna försök.

4.4. Trä

4.4.1. Begrepp, litteratur

Många forskare uppfattar endast krypning som en reologisk egenskap hos trä. Genomgången nedan är präglad av denna uppfattning. Krypningen är emellertid i mycket hög grad beroende av fukthalt och fuktrörelser i veden, och det förefaller därför rimligt att också uppfatta krympning som en reologisk egenskap för att få en bättre överblick över vad som händer.

Det saknas ett översiktsverk över träs reologiska egenskaper. Hos Kollmann och Côté (68) ges endast kortfattat vissa principer för träs reologi, huvudsakligen baserat på reologiska modeller utan modellkoefficienter. En kort översiktsartikel har skrivits av Norén (65) och Barkas (49) har diskuterat träs hygroskopiska och viskoelastiska egenskaper på termodynamisk grund. Denna bok är mycket väsentlig för forskarna, men den ger inga regler som direkt kan användas i byggnadspraktiken. P F Hansen (67) beskriver deformations- och brottfenomen.

Träs struktur är mycket komplicerad med strukturelement i olika storlekar, anisotropi och växtfel. Ytterligare är veden starkt hygroskopiskt. Detta orsakar att det är vanskligt att studera träs deformationsegenskaper. Spridningarna på försöken blir stora, och försöken är svårtolkade. Detta är säkert en huvudorsak till att översiktsverk saknas.

Nedan genomgås några uppgifter från litteraturen, som kan ge vissa fingervisningar om storleksordningen och tidsberoende hos träs krypning. I alla artiklarna studeras små provkroppar av rent trä.

4.4.2. Orsaker till krypning

Orsaken till träs krypning är enligt Norén (65) dels en skjuvning av cellulosamolekylerna i de amorfa områden mellan kristalliterna, dels en skjuvning i fogarna mellan fibrillerna. Vattnet i strukturen får betydelse genom att det är bundet på de ställen där skjuvningen försiggår. Vid stora vattenhalter har man tjocka vattenskikt och stora krypningar.

Ovanstående gäller låga spänningsnivåer. För högre spänningar orsakas krypningen av mikrosprickor, som efterhand växer och orsakar totalbrott. Detta har studerats av Debaise et al (66) genom att lyssna på antalet av de ljudimpulser, som uppstår vid varje litet brott. De kunde påvisa enstaka brott redan vid belastningar mellan 5 % och 20 % av brottlasten.

Med ledning av Norén's förklaring ovan kan man förvänta att trä med relativt många kristalliter och små amorfa områden kryper mindre än trä med få kristalliter. (Det är bekant att kristallina material kryper mindre än amorfa.) Förhållandet belyses med försök av Miller och Benicak (67). De har tagit kvoten mellan elasticitetsmodul, E, och volym-

vikt, γ, som mått för kristallinitetsgraden. E/γ växer med kristalliniten. Den är ytterligare proportionell mot en provkropps egensvängningsfrekvens i kvadrat, f^2. Dvs att man genom att mäta f^2 skulle kunna få en skattning av krypningen.

På fig 4.3 ses resultatet av en av författarnas försöksserier. De finner en korrelation av typen $\varepsilon_c = a - b \cdot f^2$, där a och b är försökskonstanter. Korrelationen visar att man genom att mäta ett träelements egensvängningsfrekvens kan utvärdera dess deformationsbenägenhet.

Det skall anmärkas att krypningen i träförband blir mycket större än i rent trä. Detta orsakas bl a av att spänningarna i träet under spik och skruv i skarvarna blir mycket stora. Krypning i träförband har behandlats av Norén i ett flertal publikationer (bl a Norén (61) och (68)).

4.4.3. Krypningsbeskrivning

Det finns ej något generellt accepterat uttryck för hur träs krypning beror av tiden. Norén (65) nämner kort att potensfuktioner kan vara lämpliga. Försök på olika träslag och med olika belastningsriktningar vid konstant fuktkvot utförda av Ethington (65), Debaise et al (66) Bhatnager (64), Rose (65) och Lundgren (67) har undersökts av författaren. De visar alla att en potensfunktion som ekv III i tabell 1 kan användas. Potensen är av storleksordningen 0.2 - 0.4.

Kollmann (68) hävdar att trä beter sig som ett Burgers material, men han anger inga koefficienter för ekvationen.

I några artiklar beskrivs krypförloppet med ekvationen för två Kelvinelement kopplade i serie (bl a Rose (65)).

Krypkurvor för sorptionskrypning kan ej anges i en enkel generell form. Schniewind (66) föreslår en potensfunktion, där potensen är en funktion av fuktkvoten.

Från Kollmann (51) återges exempel på krypningens tidsförlopp, för balsaträ belastat med relativ hög last. Det framgår att trä kan uppvisa primär, sekundär och tertiär krypning, (fig 4.4).

Det är mycket svårt att få ett intryck av krypningens storleksordning från de olika försöken. Alla de av författaren studerade försöken är utförda på små felfria provstavar. På grund av växtfel och dylikt skall man icke förvänta mindre krypning hos trä i virkesdimensioner än vad man finner hos små felfria provstavar.

Norén (65) anger att kryptalet för furu vid böjning, tryck och dragning i fiberriktningen efter flera års förlopp kan uppgå till ca 1. Det upplyses ingenting om fuktförhållanden. Vid tryck vinkelrätt mot fibrerna får man större kryptal än vid belastning parallellt.

Perkitny och Perkitny (66) har för furu böjbelastad till 40 % av σ_B efter 10 dygn funnit $\phi = 0.25$. Detta pekar mot ett kryptal efter ett år på ca 1.5.

Belastning vinkelrätt mot fibrerna ger mycket större krypning per spänningsenhet. Lundgren (67) visar resultat för dragning med 1 kp/cm^2 i furu i jämnvikt vid 95 % rf som pekar mot kryptal på 10 à 15 efter ett år.

Kollmann anger att kryptalet är oberoende av fuktkvoten. Detta motsäges ej av försök undersökta av författaren.

Gränsen för proportionalitet mellan spänning och krypning anges av många författare att ligga på 50 - 60 % av brottspänningen. Denna siffra sjunker troligen med ökande fuktkvot.

Temperaturen har också betydelse för krypningen. Undersökningar av denna faktor försvåras emellertid av att fukthalten i veden ändras med ändringar i temperaturen.

Sorptionskrypning har som nämnts i avsnitt 3.8 studerats av Eriksson och Norén (65), se fig 3.3. Vid dragförsök konstateras ett kryptal efter 30 dygn på 0.7 vid växlande luftfuktighet mellan 25 och 70 % rf, medan ett prov vid 70 % rf konstant hade ett kryptal på 0.2.

Hearmon och Paton (64) har gjort ett mycket extremt experiment.

Provkroppar av bok om 2x2x60 mm böjbelastades och utsattes för fuktväxlingar mellan 93 % rf och 0 % rf med 1 dygns period. Efter 27 cykler bröt provet efter att ha kommit upp till kryptal på 25. Ett kontrollprov vid 93 % rf hade då ett kryptal på 2 (se fig 4.5).

Schniewind (66) har på bok uppmätt en tredubbling av krypningen vid en uttorkning från 25 % till 8 % fuktkvot i relation till ett prov med konstant fuktkvot över 30 %. Perkitny (65) påpekar att även obetydliga ändringar på ± 1 % rf influerar krypningen.

Barkas (49) och Kauman (66) pekar på termodynamiken som verktyg för att förklara och beräkna viskösa och plastiska deformationer i trä. Det termodynamiska underlaget för träs fuktbetingade deformationer har givits av bl a P F Hansen (68)

4.4.4. Träbaserade produkter

Med träbaserade produkter menas här plywood, spånskivor och träfiberskivor (board). Grundkrypning hos dessa material har bl a studerats av Lundgren (67). Lundgrens resultat visar att grundkrypningen vid dragbelastning hos alla produkterna kan beskrivas med en potensfunktion, där potensen blir ca 0.25. Krypkurvor för U-plywood och board enligt Lundgren redovisas på fig 4.6.

Kryptalet efter ett år blir enligt Lundgrens resultat för material vid fuktjämnvikt med 80-90 % rf för plywood ca 1, för spånskiva ca 2, för byggboard ca 5, för hård board ca 4 och för oljehärdad board ca 2. Kryptalet är dock beroende av fuktkvoten.

Perkitny och Perkitny (66) anger för spånskivor med 20 % fuktkvot kryptal som kan extrapoleras till 5 à 6 efter ett år. För board anges resultat som kan extrapoleras till 8 à 10 efter ett år. Dessa siffror är högre än Lundgrens motsvarande. Detta kan vara orsakat av att det rör sig om olika fabrikat.

Ett speciellt problem vid användning av board är dess dimensionsändringar vid fuktväxlingar. Detta har även studerats av Lundgren.

Gränsen för proportionalitet mellan krypning och spänning ligger vid 40-50 % av brottspänningen. Långtidshållfastheten för board är extremt låg. Lundgren rekommenderar att vid konstruktion med dessa material dimensionera för 15-20 % av korttidsbrottlasten.

4.5. Metaller

4.5.1. Begrepp, litteratur

Metallernas reologiska egenskaper omfattar med den breda betydelsen av ordet reologi elasticitet, plasticitet (flytning), sprött brott (spec hos stål), utmattningsbrott, krypning och relaxation. Metallers krypning har mycket ingående behandlats av Odqvist och Hult (62). Ett aktuellt översiktsverk om metallens mekaniska egenskaper med anknytning till dislokationsteorin har skrivits av McLean (65). Nedan skall en kort anmärkning om plasticitet anföras, varefter, jfr definitionen i avsnitt 2.2, endast krypning och relaxation behandlas. Sprött brott har omtalats tidigare av författaren (Bergström et al (65).

Varmvalsade metaller deformeras plastiskt vid höga spänningar. Mjuka kolstål har som bekant den speciella egenskapen, att deformationen ökar utan ökning av spänningen, när sträckgränsen har nåtts. Deformationen sker snabbt, så snabbt att man i byggpraktiken kan kalla den för momentan.

I analogi med vätskornas flytning har någon velat ange en viskositetskoefficient η för ståls plastiska deformation. Mjukt ståls "flytning" skiljer sig emellertid från flytning i vätskor bl a genom att man ej kan höja den yttre kraften genom att höja deformationshastigheten. Det är därför meningslöst att för flytning i stål tala om en viskositetskoefficient. Man kan endast konstatera, att stålet flyter vid en viss spänning. Det fortsätter att flyta vid denna spänning intill oordningen i kristallgittren har blivit så stor att spänningen måste ökas för att deformationen skall kunna fortsätta.

Sedan Thurston 1883 och Hove 1884 offentliggjorde arbeten där de påpekade metallernas "tålamod" (eng "patience"), har mer än 30 olika ekvationstyper föreslagits för att beskriva krypningens tidsförlopp

(enligt Bhattacharya et al (52)).

4.5.2. Kryporsaker

Sedan 20-talet har metallernas dislokationsteori utvecklats. Det är i dag möjligt att utifrån denna teori motivera ett antal tidsförlopp och i övrigtbeskriva krypningens och relaxationens förhållande till temperatur, belastningsintensitet, metallstruktur osv (McLean (65)).

Krypning uppstår enligt McLean, när en kallbearbetad metall utsättes för en belastning som är högre än den ursprungliga sträckgränsen. Man kan skilja mellan tre huvudtyper, logaritmisk krypning, återhämtningskrypning (recovery creep) och diffusionskrypning.

Logaritmisk krypning förekommer vid temperaturer som är låga i relation till den aktuella metallens smältpunkt. Vid denna typ av krypning kallbearbetas materialet genom deformationen utan att någon återhämtning kan ske, varför kryphastigheten långsamt avtar. Krypdeformationen blir proportionell mot logaritmen för belastningstiden.

$$\varepsilon_c = A \log t + B \qquad (4.5)$$

McLean motiverar en logaritmisk krypekvation dislokationsteoretiskt. En logaritmisk krypning är alltid primär (jfr fig 3.2).

Vid temperaturer, som är höga i relation till metallens smältpunkt kan återhämtning äga rum i kristallerna under deformationen. Detta betyder att kalldeformationens förstyvande effekt försvinner, varför kryphastigheten kan hålla sig konstant eller öka med töjningen. Denna återhämtningskrypning är den vanligaste i maskinkonstruktioner. Den är mycket beroende av ändringar i temperatur och belastning. Det är här Nortons lag, ekv (3.3) har betydelse. McLean (65) anger att denna typ av krypning kan empiriskt beskrivas med ekvationer av typen

$$\varepsilon_c = A \cdot t^{b1} + B\, t^{b2} \qquad (4.6)$$

Eventuellt kan ett av leden slopas.

Förloppet av återhämtningskrypning vid höga belastningar och/eller temperaturer kan delas i primär, sekundär och tertiär krypning. Under den primära krypningen är kalldeformationens förstyvande effekt kraftigare än återhämtningseffekten. Efterhand kommer de två effekterna i balans, man får konstant kryphastighet dvs sekundär krypning. Efter viss tid, som beror på spänningsnivån, börjar kryphastigheten åter att växa, man får tertiär krypning. Ökningen av kryphastigheten orsakas av diverse metallurgiska förändringar, t ex kan hålrum, så kallade kaviteter, bildas i korngränserna och några metaller kan börja rekristallisera. Det tertiära krypförloppet slutar med brott.

Vanligt konstruktionsstål uppvisar ingen krypning vid i byggnader normalt förekommande spänningar och temperaturer. För byggnadskonstruktörer är särskilt förspänningsståls relaxation och aluminiumlegeringars krypning av intresse. Dessa fenomen behandlas nedan.

4.5.3. Förspänningsstål

Den mest aktuella översikten över läget inom forskningen i förspänningsståls relaxationsbenägenhet ges av Mihajlov (68) i en generalrapport vid FIP's symposium i Madrid 1968 om förspänningsstål. Många andra av bidragen till detta symposium förefaller ytterligt intressanta.

Den temperatur som förspänningsstålen används vid är låg i förhållanden till stål smältpunkt, varför krypning och relaxation enligt McLean's regler ovan bör ha logaritmiskt tidsförlopp. Detta bekräftas också av några av de källor som har studerats. Bjuggren (63) har gjort en sammanställning av litteratur om krypning och relaxation hos förspänningsstål, där han redovisar försök av Fagersta Bruk som ger krypning enligt ekv (4.5). Försök av Krchow och Suchy (68) visar mycket exakt logaritmisk krypning.

Logaritmisk relaxation förekommer också i försök av Hedberg, Berntsson och Malinowski (66). De har mätt relaxationen i förspänningsstål, som utsättes för värmebehandlingar motsvarande värmehärdning av betong, nämligen 10 timmar i 60°C och 6 timmar i 100°C. Mätningen fortsatte i 4000 timmar. Kontrollproven vid 20°C visar logaritmisk relaxation, som efter 1000 timmar är 25 °/oo för $\sigma_o = 0.6 \cdot \sigma_B$.

Sedan verkningarna av värmebehandlingen är borta visar sig relaxationskurvorna för de värmebehandlade stålen att ligga över kontrollproven. 60°C-proven är parallellförskjutna ca 50 % och 100°C-proven ca 100 %.

Större delen av de av författaren studerade försöken redovisas emellertid bäst genom två eller flera logaritmiska tidsfunktioner. Detta gäller t ex försök av Magnel redovisade av Bjuggren (63). En funktion gäller under 400 - 1000 timmar, härefter gäller en annan med större lutning i relaxations-log t-diagrammet.

Papsdorf och Schwier har utfört omfattande relaxationsprov där man enligt Bjuggren (63) finner två olika logaritmiska funktionsområden på vardera sidan om 1000 timmar.

Engberg och Wallin (66) har utfört relaxationsprov på ett utländskt stål i 4 år. De finner att linjärt samband mellan relaxation och logaritmen för tiden efter 400 till 1000 timmar. Efter 4 år är relaxationen av storleksordningen 10 %. Belastningen var ca $0.75 \cdot \sigma_{0.2}$.

Mihajlov (68) påpekar att den första delen av krypningen äger rum innan de första timmarna och att man härefter kan begagna ekvationer av typen ekv (4.5). I fig 4.7 redovisas ett försök av Dumas (enligt Mihajlov (68)) som visar exempel på att man kan beskriva förloppet med tre logaritmiska tidsfunktioner.

Även potensfunktioner som ekv (4.6) kan komma i användning för att beskriva förspänningsståls beteende (Cahill (68)).

Förspänningsstålens relaxation har intresse, därför att den ger en förlust av förspänningskraft, som måste beaktas vid beräkning av konstruktioner. De större relaxationsundersökningarna syftar till att ge skattningar av slutspänningsförluster. Papsdorf och Schwier's extrapolationer av slutspänningsförluster redovisas på fig 4.8. Man ser att spänningsförlusterna först blir allvarliga vid belastningar över ca 50 % av sträckgränsen. Ytterligare är det ett utpräglat temperaturberoende.

Papsdorf & Schwiers försök rekommenderas av Lorentsen (63) som beräkningsunderlag när inget bättre vetande finns. Numera kan de större stålleverantörerna emellertid ofta ge mera detaljerade upplysningar.

Stålets relaxation kan nedsättas genom en viss överspänning innan den slutliga uppspänningen. Denna effekt förefaller emellertid ej varaktig (jfr Engberg och Wallin (66)). Metoder som modifierar framställningsprocessen så kallade stabilisering har bättre effekt. Vid denna process dras stålet vid en temperatur på 350-400°C. Relaxationen kan härigenom varaktigt nedsättas med 20-50 % i relation till relaxation i obehandlat tillstånd. En mycket speciell komplicerad stabilisering utvecklad av Dumas kan ge en nästan total eliminering av krypningen (jfr fig 4.7).

Orsakerna till att kännedomen om spännstålens relaxations- och krypegenskaper hittills har varit så blygsamma är bl a två. För det första utgör denna ståltyp en mycket liten del av fabrikernas produktion och har därför ej kunnat motivera mycken fabrikantforskning. För det andra är spännförlusterna till följd av stålets relaxation små i relation till de samlade spännförlusterna, varför offentliga institut ej har satsat pengar på detta problem. Spännförlusterna för kabelbetong räknas således överslagsmässigt till 10-15 % till följd av friktion i kabelgångarna, 10-15 % till följd av betongs krypning, och maximalt 10 % till följd av stålets relaxation.

För närvarande håller reaktortankar i förspänd betong emellertid på att utvecklas. I dessa konstruktioner kan man få användningstemperaturer, som ligger över de som är vanliga för byggnadskonstruktioner. Denna aspekt tillsammans med den skärpta konkurrensen har drivit fram en omfattande forskning under de senaste 4-5 åren. Det är resultat från denna forskningsvåg som bl a har redovisats i Madrid (Mihajlov (68)).

Upplysningarna om krypning och relaxation hos förspänningsstål är sålunda efterhand ganska många, men ej samstämmiga. Kvalitativt vet vi att fenomenen påverkas av stålkvalitet, spänning, temperatur och tidigare belastningshistoria. En sammanställning av de olika resultaten mot bakgrund av de senaste metallurgiska rönen kunde troligen uppklara några av motsägelserna. Tills vidare måste man, om ej fabrikantupplysningar

föreligger, ta mycket schablonartat på problemen, t ex som visats av Lorentzen (63).

4.5.4. Aluminiumlegeringar

Aluminiumlegeringarnas smältpunkter ligger i området 550-660°C. Användningstemperaturerna är höga i relation till detta, varför man får återhämtningskrypning. McLean (65) anger att denna typ av krypning kan beskrivas med ekvationer av typen

$$\varepsilon_c = A \cdot t^{b1} + B \cdot t^{b2}$$

Detta bekräftas av Finnie och Heller (59) och Johnson och Frost (52).

Altenpohl (65) anger resultat som beskrivs av en potensfunktion under en bestämd tid och en annan potensfunktion efter denna tid.

Försök av Weller et al (64) med krypning i 1000 timmar beskrivs utmärkt av en enkel potensfunktion med potensen av storleksordningen 0.25.

Nedan anges försöksresultat från Altenpohl (65).

Koefficienterna ger intryck av större noggrannhet än man kan uppnå i ett krypförsök.

Krypfunktioner för Al-legeringar enligt Alten[illegible] (65)

Legering Behandling	$\sigma_{0.2}$ kp/mm^2	σ_c	Temp °C	Funktion t i tim,	töjning i 10^{-5}
AlMgSi 1	30	15	26	t < 102 h	$1.355 \cdot t^{0.273}$
varmåldrat				t > 102 h	$0.857 \cdot t^{0.372}$
	30	15	101	t < 202 h	$8.831 \cdot t^{0.256}$
				t > 202 h	$4.818 \cdot t^{0.370}$
AlCuMg 1	27	13	26	t < 197 h	$0.280 \cdot t^{0.231}$
				t > 197 h	$0.175 \cdot t^{0.231}$
kallåldrat	27	21	100	t < 566 h	$0.801 \cdot t^{0.484}$
				t > 566 h	$0.157 \cdot t^{0.741}$

Krypningens spänningsberoende följer Nortons lag. Från försök av Weller et al vid 20°C har författaren funnit värden på potensen n av storleksordningen 13-14. Detta innebär att krypningen vid de måttliga spänningar som oftast härskar i byggnadskonstruktioner är obefintlig.

Krypningen ökar med temperaturen enligt ekv (3.6). För byggnadskonstruktioner kan det bli nödvändigt att ta hänsyn till denna ökning om temperaturen går över 60°C konstant.

I byggnadskosntruktioner kan man ta hänsyn till krypningen genom att sänka den beräkningsmässiga sträckgränsen. Enligt SVR:s Aluminiumnormkommitté (66) skall man om konstruktionens långtidsbelastning Q överstiger 80 % av den dimensionerande maximumsbelastningen Q_m nedsätta den räkningsmässiga sträckgränsen $\sigma^x_{0.2}$ enligt formeln

$$\sigma^x_{0.2} = (1.8 - Q/Q_m)\ \sigma_{0.2}.$$

Denna formel anknyter till bestämningen av kvoten $\sigma_{0.2,\ 1000}/\sigma_{0.2}$, (betr $\sigma_{0.2,\ 1000}$ se avsnitt 3.7). I aluminiumkonstruktionsnormerna (66) anges följande värden för området 20-60°C. De högre värdena gäller för ca 20°C. Värdena härrör bl a från Weller et al.

Kvoten $\sigma_{0.2,\ 1000}/\ \sigma_{0.2}$ för några Al-legeringar

Legering	60°C ⟵ 20°C
AlMg 2	0.8 - 0.9
AlSiMg, kallåldrad	0.95
AlCuSiMg, kallåldrad	0.9 - 0.95
AlZn4Mg, kallåldrad	0.85 - 0.95
AlSiMg, varmåldrad	0.8 - 0.85
AlZn4Mg, varmåldrad	0.7 - 0.9

4.6. Andra fasta material

De syntetiska materialen, plaster och gummi, ingår i många olika funktioner i moderna byggnader. Plast användes t ex som armatur, lagermaterial, lim och mycket viktigt, fogmassor. Denna materialgrupp uppvisar relativt större tidsberoende deformationer, som ofta kan orsaka skadefall.

Som tidigare nämnts har det ej varit möjligt att effektivt bevaka litteraturen om plasternas reologi. Bland översiktsverken skall nämnas Baer (64), Ritchie (65) och Tobolsky (60) (den sistnämnde rekommenderad av Odqvist (65)). Eirich (58-60) har artiklar om specialproblem. Tidskrifterna "Rheologica Acta" och "Rheological Abstracts" domineras helt av artiklar om fasta och flytande syntetiska produkter.

Lims reologi tas upp i en översiktsartikel av Krogh (65). Forskning i fogmassornas reologi saknas.

Jordarter behandlas vanligtvis under geotekniken. Krawtchenko och Sirieys (64) har redigerat en mycket innehållsrik och nyanserad kongressberättelse om reologi och jordarternas mekanik. Hansen (65) har skrivit en översiktsartikel om detta.

De bituminösa produkternas materiallära hör traditionellt hemma i väggbyggnadstekniken och dessa material har därför ej behandlats här.

4.7. Färsk betong

De reologiska egenskaperna hos färsk betong, som är ett tixotropt material, är i reologisk terminologi flytgräns och viskositet. I teknisk terminologi betecknas dessa egenskaper med ord som bearbetbarhet, konsistens, seghet, kärvhet eller styvhet. Warris (68) har givit en noggrann översikt över dagens vetande om färsk betongs komplicerade egenskaper i samband med ett RILEM-symposium om tillsatsmedelns betydelse.

Orsakerna till det tixotropa beteendet har kvalitativt förklarats i avsnitt 3.9. Några naturvetenskapliga teorier för hur de olika ämnena

som ingår i betongen påverkar dess flytegenskaper har hittills ej utvecklats i betongforskningen. Den teknik som tillämpas är rent empirisk. Det är t ex någorlunda bekant hur betongsammansättningen och delmaterialens egenskaper influerar flytegenskaperna. Detta vetande ingår i den vanliga betongproportioneringsproceduren (se t ex Bergström (65)). Det finns emellertid många problem kvar att lösa, bl a hur och varför de olika tillsatsmedlen påverkar flytegenskaperna. Det är troligt att dessa problem skulle kunna lösas rationellt genom att introducera fysik och kemi i undersökningarna. Detta diskuteras i en holländsk rapport översatt till engelska av von Amerongen (68).

De mätmetoder som användes i praktiken, sättmått, Vebe, Mo-mått o a är alla teknologiska prov som ger mätresultatet i speciella apparat-sorter, t ex cm-S, VB-sek och Mo-slag. Det vore önskvärt m a p anknytningen till fysiken att få mätmetoder som ger resultat i ett fysiskt enhetssystem.

l'Hemite o a försökte tidigt att införa mätning av färsk betongs egenskaper med de från andra vetenskapsgrenar kända viskosimetrar, som fyller kravet ovan. Försöket slog emellertid ej genom. Detta berodde på att dessa mätare var ganska opraktiska att använda på arbetsplatsen och troligen också på att tillverkarna ej har känt något behov av att kunna mäta betongens egenskaper i fysiska storheter.

Rotationsviskosimetrarna har emellertid återigen förts fram av bl a Pilpel (64), Bombled (64) och Powers (66) och även i en form som kan användas i praktiken (Komlos och Oprsal (68)). Fördelen med rotationsviskosimetern är, förutom att man mäter i ett fysiskt enhetssystem, att man kan mäta såväl sammanhangskraften som flytegenskaperna med samma instrument.

På fig 4.9 redovisas en arbetskurva för färskt bruk mätt med viskosimeter av Powers (66). Lutningen på kurvan ger ett uttryck för brukets styvhet, den inre sammanhängskraften uttryckes med flytgränsen, och viskositeten (bearbetbarheten) bestämmes genom att höja viskosimeterns hastighet. Powers (66) diskuterar i sin artikel relationerna mellan den färska betongens reologiska egenskaper och betongsammansättningen.

5. AVSLUTNING

Man kan konstatera ett allmänt behov av forskning inom alla materialgrupper med avseende på såväl beskrivning av krypning som orsaker till den. Speciellt skall dock framhävas behovet inom de materialgrupper, för vilka inte ens storleksordningen av krypningen är känd eller är mycket osäker, såsom svensk porballastbetong, gasbetong, konstruktionsträ i de båda T-virkesklasserna och förspänningstråd av olika fabrikat.

Som framgår av avsnitten om betong och trä har närvaro av vatten och transport av vatten stor betydelse för förloppet av krypningen. Om man skall komma längre i förklaring och beskrivning av deformationerna hos dessa porösa material, måste man begagna fuktmekanikens termodynamik.

Framställningen i denna rapport har inskränkts till enaxligt spänningstillstånd. I den mån byggnadskonstruktörerna så kräver måste förhållanden för två- och treaxligt spänningstillstånd även studeras (jfr L F Nielsen (66). Erfarenheten visar, att man kan komma ganska långt med skattningar utifrån det enaxliga spänningstillståndet. Detta måste dock i det långa loppet vara en otillfredsställande lösning, när avancerade beräkningsmetoder skall användas.

Att så många material från olika materialgrupper har tidsförlopp enl en potensfunktion, pekar mot att en gemensam teori för materialens krypbeteende bör kunna uppställas. Odqvist (65 a) refererar Nadais "tillståndsekvation", $\dot{\varepsilon}_c = f(\sigma) / g(\varepsilon) = K\,\sigma^p/\varepsilon^q$, som har uppställts för beskrivning av krypning i primärområdet. K, p och q är konstanter. Efter integration får man med $\varepsilon = o$ för $t = o$

$$\varepsilon = k \cdot \sigma^n \cdot t^{1/(1+q)},$$

som är en potensfunktion av tiden. (k och n är konstanter beroende av K, p och q). Denna "tillståndsekvation" är rent empirisk, men möjligen kan undersökning av när den är uppfylld bilda grundval för en genensam teori.

Det ses av framställningen ovan, att det finns möjligheter för reologiforskning långt in i framtiden. Hur mycket som skall satsas här måste naturligtvis ses i sammanhang med behovet av forskning i andra konstruktionsproblem.

Sammanfattning

I rapporten ges en översikt över de viktigare problemställningarna i byggnadsmaterialreologin.

Reologi definieras som läran om materialens av yttre last orsakade tidsberoende deformationer. Med "lära" förstås såväl förklaring som beskrivning av fenomenen.

I rapporten behandlas mest krypning, men det skall påpekas, att för en fullständig förståelse av de hygroskopiska materialens krypbeteende måste också deras krympning studeras.

I ett översiktsavsnitt genomgås hållfasthetslärans idealmaterial, de reologiska modellerna, krypningens beroende av tid, spänning och temperatur, omräkning mellan krypning och relaxation, olika krypmått, krypningens dimensionsberoende och tixotropi.

I materialdelen genomgås de tidsberoende deformationerna hos hårdnad betong, gasbetong, trä, träbaserade produkter, stål och aluminium. Färsk betongs egenskaper omtalas kortfattat. För varje material redovisas problemställning, litteratur, orsaker till tidsberoende deformationer och beskrivning av krypning eller relaxation.

Avslutningsvis sammanfattas forskningsbehoven på området.

Litteraturlistans 109 titlar har klassificerats efter material.

English summary

This paper contains a review of the more important approaches to problems concerning the rheology of building materials.

Rheology is in chapter 2 defined as the science of time-dependent deformation of materials caused by external loads. The term 'science' covers both the explanation and description of the phenomena.

The paper deals mainly with creep. It is, however, pointed out that for a full understanding of the creep behaviour of the hygroscopic materials their shrinkage must also be studied.

In chapter 3 ideal materials are treated, rheological models are surveyed, creep as function of time, stress and temperature is discussed as well as relaxation, different creep characteristics, size effects and thixotropy.

Chapter 4 deals with materials. The time-dependent deformations of hardened concrete, areated concrete, wood, products on a wood basis, steel and aluminium are discussed. The properties of fresh concrete are briefly dealt with. For each material an account is given of the approach to the problem, the litterature, the reasons for time-dependent deformations and descriptions of creep or relaxation.

In chapter 5, the demands for research in this field are summarized.

The 109 titles contained in the bibliography are classified according to materials.

LITTERATUR

I listan nedan har redovisats fler titlar än vad som refereras i rapporten. Titlarna har klassificerats med bokstäver enligt följande kod:

A	Allmänt om reologi	(Rheology in common)
b	betong, färsk	(Fresh concrete)
B	Betong, hårdnad	(Hardened concrete)
G	Gasbetong	(Aerated concrete)
T	Trä och träbaserade produkter	(Wood and wood based products)
S	Stål	(Steel)
Al	Aluminium	(Aluminium)
P	Plaster	(Plastics)
D	Diverse material	(Sundry materials)

B AHLGREN, L: Krympundersökning för Statens Betongkommitté. Inledande litteraturundersökning. Manuskript. Lund 1967.

Al ALTENPOHL, D: Aluminium und Aluminiumlegierungen. Springer, 1965.

A, P BAER, E: Engineering design for plastics. New York 1964.

A, T BARKAS, W W: The swelling of wood under stress. London 1949.

B BERGSTRÖM, S G: Kompendium i byggnadsmateriallära, FK I, Inst för byggnadsteknik, LTH. Lund 1967.

A, S BERGSTRÖM, S G, HALVORSEN, U A och NIELSEN, A: Kompendium i byggnadsmateriallära, del II. Inst för byggnadsteknik, LTH. Lund 1965.

B BERGSTRÖM, S G och WARRIS, B: Betongens egenskaper och provning. Handboken BYGG, del 2. kap 241. Stockholm 1968.

T BHATNAGER, N S: Kriechen von Holz bei Zugbeanspruchung in Faserrichtung. Holz als Roh und Werkstoff. Årg 22/8, s 296-299. Aug 1964.

S, A1 BHATTACHARYA, S, CONGREVE, W K A och THOMPSON, F C: The creep time relationship under constant tensile stress. J of the Institute of Metals, vol 83, s 83-92. 1952-53.

S BJUGGREN, U: Material (artikel i Spännbetong, red av M Lorentsen), s 19-43. Karlshamn 1963.

b BOMBLED, J P: Rheology of fresh concrete. Rev Mat, s 339-351. 1964.

S CAHILL, T: Relaxation losses in stabilized prestressing steels. Preprint from FIP Symposium on Steel for Prestressing, Madrid 1968.

B CEMENT AND CONCRETE ASS (C & C A): Annotated bibliography on the creep and shrinkage of concrete. London 1965.

B COMITÉ EUROPÉEN DU BÉTON (CEB): Recommandations pratiques unifiées pour le calcul et l'exécution des ouvrages en béton armé. (Avsnitt R 1.2). Paris 1964.

A, P, D COPLEY, A L (red) Part 4 of the proceedings of The Fourth International Congres on Rheology. New York 1965.

T DEBAISE, G R, PORTER, A W och PENTONEY, R E: Morphology and mechanics of wood fracture. Materials Res and Standards. Årg 6/10, s 493-499. Okt 1966.

A, P, D EIRICH, F R: Rheology. Theory and applications. Vol I-III, New York 1956, 1958, 1960.

S ENGBERG, E och WALLIN L: Kryprelaxationsprov med höghållfast förspänningstråd under lång tid. Nordisk Betong nr 3, s 237. 1966.

T ERIKSSON, L och NORÉN, B: Der Einfluss von Feuchtigkeitsänderungen auf die Verformung von Holz bei Zug in Faserrichtung. Holz als Roh und Werkstoff. Årg 23/5, s 201-209. Maj 1965.

T ETHINGTON, R L och YOUNGS, R L: Das rheologische Verhalten von Roteiche (Quercus lubra L.) bei Beanspruchung quer zur Faserrichtung. Holz als Roh und Werkstoff. Årg 23/5, s 196-201. Maj 1965.

A FINNIE, I och HELLER, W R: Creep of engineering materials. New York 1959.

b FORSLIND, E: Fresh concrete. Kap VII i Reiner (54).

A FORSLIND, E: Reologi. Särtryck ur Svensk Naturvetenskap. Stockholm 1966.

A FREDRICKSON, A G: Principles and applications of rheology. Englewood Cliffs. 1964.

A FREUDENTHAL, A M: The inelastic behavior of engineering materials and structures. John Wiley & Son, New York 1950.

A, B GLUBE, E: Et elektrisk analogikredslöb til en mekanisk, rheologisk model for beton. B-undervisning och forskning 67. Köpenhamn 1967.

B GRUDEMO, A: Cementpastans mikrostruktur. Gullkornet, vol 9 nr 1, 1959.

D HANSEN, J B: Jordarternes reologi. Ingeniören nr 23, s 725-727. 1965.

T HANSEN, P F: Deformations- og brudfaenomener i trae. Dansk Selskab for Materialprövning og -forskning. Heldagsmöde nov 1067.

T HANSEN, P F: Trae og fugt. Danmarks Ingeniörakademi. Köpenhamn 1968.

B HANSEN, T C: Creep and stress relaxation of concrete. A theoretical and experimental investigation. Cement- och Betonginstitutet, Handlimgar nr 31. Stockholm 1960.

A HANSEN, T C: Estimating stress relaxation from creep data. Särtryck nr 28 från CBI. Materials Res and Standards, vol 4/1. Jan 1964.

B HANSEN, T C: Reologi inom betongtekniken. Nordisk Betong. Årg 8/1. 1964 (a).

B HANSEN, T C: Drying shrinkage of concrete due to capillary action. Köpenhamn 1967.

B HANSEN, T C och ERIKSSON, L: Temperature change effect on behavior of cement paste, mortar and concrete under load. J of the ACI, vol 63/4, s 489-504. April 1966.

B HANSEN, T C och MATTOCK, A H: Influence of size and shape of member on the shrinkage and creep of concrete. J of the ACI, vol 63/2, s 267-288. Febr 1966.

T HEARMON, R F S och PATON, I M: Moisture content changes and creep of wood. Forest Products J nr 8, s 357-359. 1964.

S HEDBERG, B och MALINOWSKI, R: Spänningsförluster i stål av olika fabrikat. Inst för byggnadsteknik, CTH. Rapport nr 17. Göteborg 1966.

S HEDBERG, B och MALINOWSKI, R: Stabilisering av förspänningsstål. Inst för byggnadsteknik, CTH. Rapport nr 19. Göteborg 1966.

B l'HERMITE, R: Le retrait des ciments mortiers et bétons. Laboratoires du Batiment et des Travaux Publics. Paris 1947.

B l'HERMITE, R: What do we know about the plastic deformation and the creep of concrete? RILEM bulletin nr 1 new series, s 21. Mars 1959.

B HOLLOWAY och WAJDA: Studying creep in concrete that is hot. Engn, s 122-123. 23.7.1965

A HULT, J: Hållfasthetslära. Stockholm 1966.

A INGENIÖREN: Nio föredrag från Reologidagen i Köpenhamn 5.11.65. Ingeniören nr 23, s 713-752. 1965.

Al JOHNSON och FROST: The temperature dependence of transient and secondary creeps of an aluminium Alloy to BS 2L42 at temperatures between 20 and 250°C and constant stress.J of Inst Metals 81:93, s 93-107. 1952-1953.

T KAUMAN, W G: On the deformation and setting of the wood cell wall. Holz als Roh und Werkstoff. Årg 24/11, s 551-556. Okt 1966.

T KINGSTON och CLERK: Some aspects of the rheological behaviour of wood. I och II. Aust. J of Appl Sc nr 12. 1961.

T KOLLMANN, F: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. I. München 1951.

T KOLLMANN, F och CÔTÉ J:r, W A: Principles of wood science and technology. I. Berlin 1968.

b KOMLOS, K och OPRSAL, M: Two devices for measuring concrete viscosity. Materials and Structures-RILEM nr 2, s 151-156. 1968.

D KROGH, J: Kläbestoffers rheologi. Ingeniören nr 23, s 732-734. 1965.

D KRAVTCHENKO, J och SIRIEYS, P M (red): Rheology and soil mechanics. IUTAM Symposium Grenoble 1964. Berlin 1966.

S KRCHOV, J och SUCHÝ, J: Relaxation of smooth patented wire. Preprint from FIP Symposium on Steel for Prestressing, Madrid 1968.

B KRUML, F: Short- and long-term deformation of structural lightweight-aggregate concrete. International Congres on Light Weight Concrete, London 1968.

S LARSON, F R och MILLER, J: Time-temperature relationship for rupture and creep stresses. Trans Am Soc Mech Eng, nr 74, s 765-771. 1952.

A, P, D LEE, E H (red) Proceedings of theFourth International Congres on Rheology. Part 1-3. New York 1965.

S LORENTSEN, M: Spännbetong, Karlshamn 1963.

T LUNDGREN, S Å: Träskivor som byggnadsmaterial. Del I. Nyköping 1968.

B MC HENRY, D: A n e w aspect of creep in concrete and its application to design. Proc. ASTM, band 43, s 1069. 1943.

S, Al MC LEAN, D: Mechanical properties of metals. London 1965.

S MIHAJLOV, K V: Stress relaxation of high-tensile steel. Preprint of General report, FIP Symposium on Steel for Prestressing. Madrid 1968.

T MILLER, D G och BENICAK, J: Relation of creep to the vibrational properties of wood. Forest Products J, s 36-39. Dec 1967.

B MULLEN, W G: Disk till Hansen och Mattock (66). J of ACI, s 1019-1021. Sept 1966.

A NADAI, A L: Theory of flow and fracture of solids. Vol 2. New York 1963.

B NASSER, K W och NEVILLE, A M: Creep of old concrete of normal and elevated temperatures. J of ACI, s 97-103. Febr 1967.

B NEVILLE, A M: Shrinkage and creep in concrete. Structural Concrete, s 49-70, 1961.

B NEVILLE, A M och MEYERS, B L: Creep of concrete. Influencing factors and prediction. Special Publation nr 9. Am Concr Inst. Detr Mich 1964.

B NEWMAN, K: Concrete systems. Artikel i Holloway: Composite Materials 1966.

G NIELSEN, A Krypning hos högtrycksånghärdad gasbetong. Inst för byggnadsteknik, LTH. Bulletin 4, Lund 1968,

B NIELSEN, L F: Krybning i uarmeret beton. Nordisk Betong nr 2, s 141-165. 1966.

B NIELSEN, L F: Om krybning og relaxation i beton. Bidrag till 6. Nordiska Betongkongressen i Göteborg 1968. DIA-B Köpenhamn 1968.

A NIELSEN, K E C: Ingeniörens Ugeblad, s 2. 23 okt 1965.

T NORÉN, B: Zur Rheologie der Holzverbände. Holz als Roh und Werkstoff. Årg 19/3, s 93-99. Mars 1961.

T NORÉN, B: Träets rheologi. Ingeniören. Årg 74/23, s 739-742. Dec 1965.

T NORÉN, B: Nailed joints - their strength and rigidity under short-term and long-term loading. Byggforskningsrådet rapport 22:1968. Stockholm 1968.

A ODQVIST, F K G: Hvad er rheologi? Ingeniören. Årg 74/23, s 713-724. 1965 (a).

A, S, Al ODQVIST, F K G: Mathematical theroy of creep and creep rupture. Oxford 1965 (b).

S, Al Odqvist, F K G och HULT, J: Kriechfestigkeit metallischer Werkstoffe. Berlin 1962.

G OTTOSON, G: Sprickbildning i mellanväggar av lättbetongplank. Inst för byggnadsteknik, KTH. Stockholm 1963.

b PAPADAKIS, M: Die Bedeutung der Feinstoffe in der Fliesskunde des Frischbetons. Betonstein-Zeitung. Årg 29/11, s 554-558. 1963.

T PERKITNY, T: Über Wechselbeziehungen zwischen Sorption, Desorption und Rheologie von Holz. Holz als Roh und Werkstoff. Årg 23/5, s 173-182. Maj 1965.

T PERKITNY, T och PERKITNY J: Vergleichende Untersuchungen über die Verformungen von Holz, Span- und Faserplatten bei langdauernder konstanter Biegebelastung. Holztechnologie. Årg 7/4, s 265-270. Nov 1966.

B PETTERSSON, O: Konstruktionslära. Kompendium. Inst för byggnadsstatik, LTH. Lund 1966.

b PILPEL, N: The rheological properties of cement and concrete. Cement Lime and Gravel, s 79-84. Mars 1964.

A POULSEN, E Rheologi som fysisk betingelse i bärande konstruktioner. Danmarks Ingeniörakademi, Bygningsafdelingen. Köpenhamn 1965.

b POWERS, T C: Some analytical aspects of fresh concrete. I och II. Cement Lime and Gravel, s 29-36 och s 67-73. Febr och mars 1966.

B POWERS, T C: Some observations on the interpretation of creep data. RILEM Bulletin 33, s 381-391, bibl s 391. 1966.

B POWERS, T C och BROWNYARD, T L: Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste. PCA. Bulletin 22. Chicago 1948.

B REICHARD, T W: Creep and drying shrinkage of lightweight and normal-weight concretes. U.S. Nat.Bur. Stand. monograph nr 74, 30 sidor, 1964 Ref. J Amer Concr Inst 61:7, s 911. 1964.

A REINER, M: Building materials, their elasticity and inelasticity. Amsterdam 1954.

A REINER, M: Deformation strain and flow. London 1960.

A REINER, M: Lectures on theoretical rheology. Amsterdam 1960.

P RITCHIE, P D: Physics of plastics. London 1965.

T ROSE, G: Das mechanische Verhalten des Kiefernholzes bei dynamischer Dauernbeanspruchung in Abhängigkeit von Belastungsart, Belastungsgrösse, Feuchtigkeit und Temperatur. Holz als Roh und Werkstoff. Årg 23/7, s 271-288. Juli 1965.

B RUETZ, W: Das Kriechen des Zementsteins im Beton und seine Beeinflussung durch gleichzeitiges Schwinden. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 183. Berlin 1966.

T SCHNIEWIND, A P: Über den Einfluss von Feuchtigkeitsänderungen auf das Kriechen von Buchenholz quer zur Faser unter Berücksichtigung von Temperatur und Temperaturänderungen. Holz als Roh und Werkstoff. Årg 24/3, s 87-98. Mars 1966.

G SCHÄFFLER, H: Kriechen von bewehrten Platten aus dampfgehärtem Gas- und Schaumbeton. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 136. Berlin 1960.

A SCOTT BLAIR, G W: A survey of general and applied rheology. London 1949.

G STATENS BETONGKOMMITTÉ: Förslag till lättbetongnormkommentarer. Duplicerad utgåva, Stockholm 1964.

Al SVR:s Aluminiumnormkommitté: Aluminiumkonstruktioner, Försöksnorm och kommentarer. Stockholm 1966.

A, P THORKILDSEN, R L: Mechanical behaviour. Kap 5 i Baer (64) New York 1964.

P TOBOLSKY, AV: Properties and structures of polymers. New York 1960.

B WAGNER, O: Das Kriechen unbewehrten Beton. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 131. Berlin 1958.

B WALZ, K och WISCHERS, G: Konstruktions-Leichtbeton höher Festigkeit. Beton-Verlag GmbH, s 63. Düsseldorf 1964.

b VAN AMERONGEN, C: Admixtures for conrete. Översättning från holländska CUR rapport 31: "Toevoegingen aan betonspecie", Amsterdam 1965. C & CR, Translation nr 131. London 1968.

b WARRIS, B: Effect of admixtures on the properties of fresh mortar and concrete. Materiaux et constructions (RILEM-Bulletin), s 97-114, Mars-april 1968.

Al WELLER, J, KÄHLING, G och REMAHNE, S: Ein Betrag zum Festigkeitsverhalten von Aluminium-Knetwerkstoffen unter statischer Dauerbeanspruchung. Aluminium. Årg 40/1, s 35-41. 1964.

B WITTMANN, F: Kriechen bei gleichzeitigem Schwinden des Zementsteins. Rheologica Acta. Band 5/3, s 198-204. 1966.

B WITTMANN, F och KLUG, P: Zum zeitlichen Verlauf des Kriechens von Zementstein und Beton. Rheologica Acta. Band 7/1, s 93-95. 1968.

SYMBOLER

De oftast använda beteckningarna är:

ε_c	kryptöjning
$\dot{\varepsilon}_c$	kryphastighet
t	tid
T	temperatur
σ	spänning
$\sigma_{0.2}$	0.2 % -gränsen för metaller
σ_B	brottspänning

Tabell 1. NÅGRA EMPIRISKA KRYPUTTRYCK

Nr	Namn och år	Uttryck	Material	Källa
I	Andrade 1910	$l = l_o(1+\beta t^{\frac{1}{3}})e^{kt}$	Många metaller	a, b
II	Findley 1944 Findley et al 1944-1958	$\varepsilon_c = \varepsilon_o + mt^n$	Linne Rayon Papper Plastlaminater Asbest Glasfiber-armerad plast	a, b
	Boller 1958		Glasfiber-armerad polyester och epoxy	a
III	Johnson & Frost 1952-1953	$\varepsilon_c = m \cdot t^n$	Aluminium-legeringar	b
	Alusiusse		Aluminium-legeringar	c
	Friedrich 1950		Betong	d
	Straub 1931		Betong	d
	Shank 1931		Betong	d
	Wittman (66)		Cementpasta	
	Lundgren (68)		Plywood Träfiberskivor Trä ⊥	
	Schäffler (60)		Gasbetong	
	Ethington (65), o.a.		Trä ⊥ och trä ||	
	Cahill (68)		Förspänningsstål	
IV	Johnson & Frost 1952-1953	$\varepsilon_c = \varepsilon_o + \Sigma a_i t^{m_i}$	Metaller vid högre temperaturer	b
	McLean 1965	$+ \Sigma b_j t^{n_j}$		

Källor: a. Thorkildsen (64)
b. Finnie och Heller (59)
c. Altenpohl (65)
d. Wagner (58)

Tabellen fortsätter v g v!

Tabell 1. NÅGRA EMPIRISKA KRYPUTTRYCK

Nr	Namn och år	Uttryck	Material	Källa
V	Ross 1936	$\varepsilon_c = t/(a + bt)$	Betong	d
	Lorman 1940	$\varepsilon_c = \sigma \cdot \varepsilon_\infty^1 \cdot t/(n+t)$	"	d
VI	Cottrell (52)	$\varepsilon_c = \varepsilon_o \log(\alpha t+1)$ $\varepsilon_c = A \log t+B$	Metaller, låg temp. Förspännings-stål	b
VII	Thomas 1933	$\varepsilon_c = (\alpha+\beta e^{-pk}) \cdot$ $\cdot(1-e^{-rt})$	Betong	d
VIII	Glanville och Thomas 1939 Dischinger 1937	$\varepsilon_c = \varepsilon_{c\,\infty} (1-e^{-f(t)})$	Betong	d

Källor: a. Thorkildsen (64) c. Altenpohl (65)
b. Finnie och Heller (59) d. Wagner (58)

Tabell 2. EXEMPEL PÅ KRYPTAL EFTER 1 ÅR

Kryptalet är definierat som $\phi = \varepsilon_c/\varepsilon_o$.

Kryptalen avser belastningar under proportionalitetsgränsen för krypning och spänning (oftast under 50 % av brottlasten). T = 20°C.

G = grundkrypning, S = sorptionskrypning, u är fuktkvot, %

Material	Kryp-typ	Ekv enl tabell 1	Kryptal efter 1 år	Källa
Betong vct 0.65, 100 % rf	G	V	∿ 1	Wagner (58)
" vct 0.65, 70 % rf	S	V	∿ 2.5	"
" vct 0.40, 70 % rf	S	V	∿ 1	"
Porballastbetong	S	-	1-2	Kruml (68)
"	G	-	0.6-1	"
Gasbetong	S	III	0.2-0.8	Schäffler (60)
" , γ=0.5, u=3	G	III	0.2-0.3	Nielsen (68)
" , γ=0.5, u=80	G	III	0.2-0.4	"
" , γ=0.5	S	-	0.8-1.2	"
Furu //	G	(III)	∿ 1	Norén (65)
" // u=10 & 20	G	III	∿ 1.5	Perkitny & P (66)
" ⊥ u∿20	G	III	10-15	Lundgren (68)
Plywood, 85 % rf	G	III	∿ 1	Lundgren (68)
Spånskiva, 90 % rf	G	III	∿ 2	"
" u∿ 10 & 20	G	III	5-6	Perkitny & P (66)
Byggboard, 80 % rf	G	III	∿ 5	Lundgren (68)
Hård board, 75 % rf	G	III	∿ 4	"
" u = 20	G	III	8-10	Perkitny & P (66)
Oljeh board, 80 % rf	G	III	∿ 2	Lundgren (68)
Förspänningstråd, $\sigma=0.73\sigma_B$	-	VI	0.2	Bjuggren (63)
AlMgSi1 varmåldrad		III	0.1	Altenpohl (65)
AlCuMg1 kallåldrad		III	0.02	"

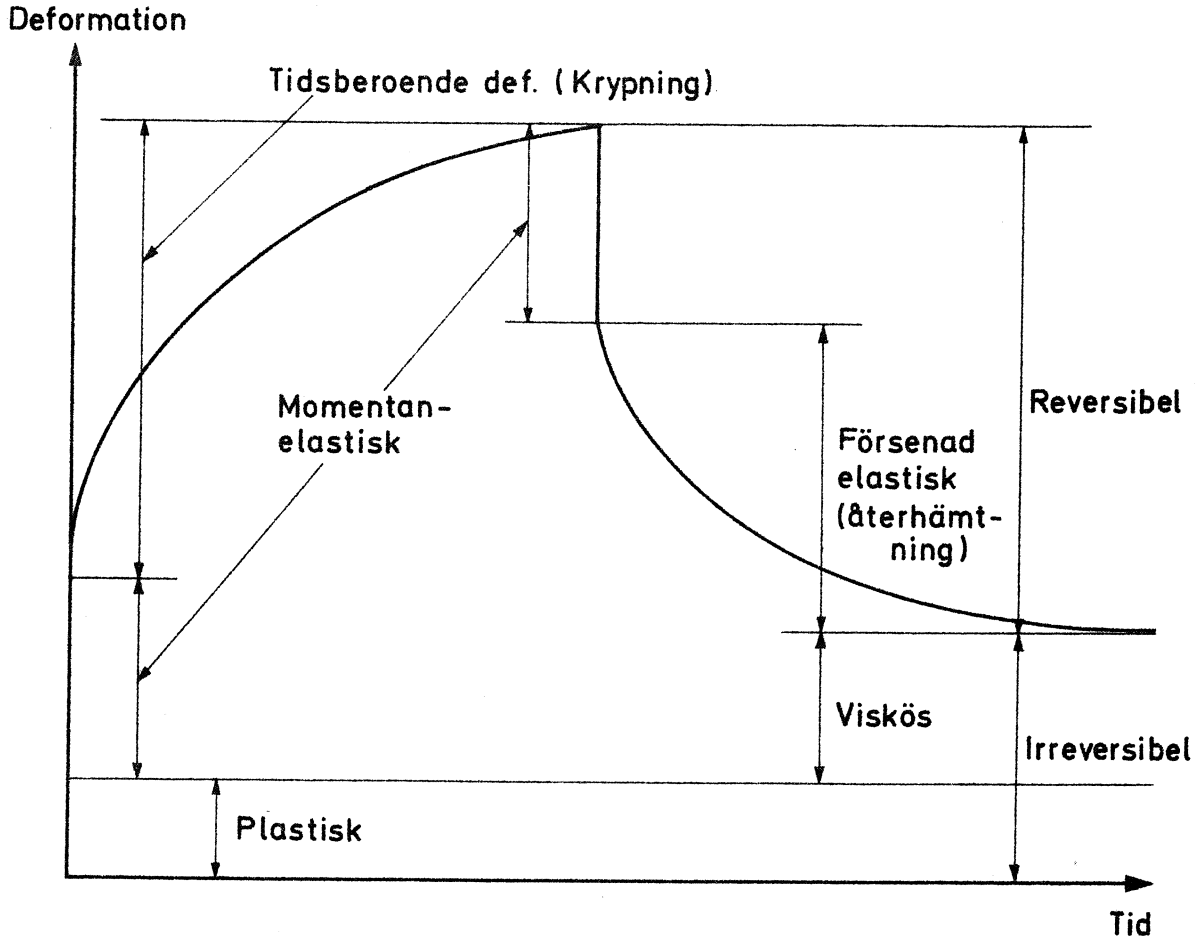


Fig 3.1 Deformations-tids-diagram för ett hypotetiskt material.

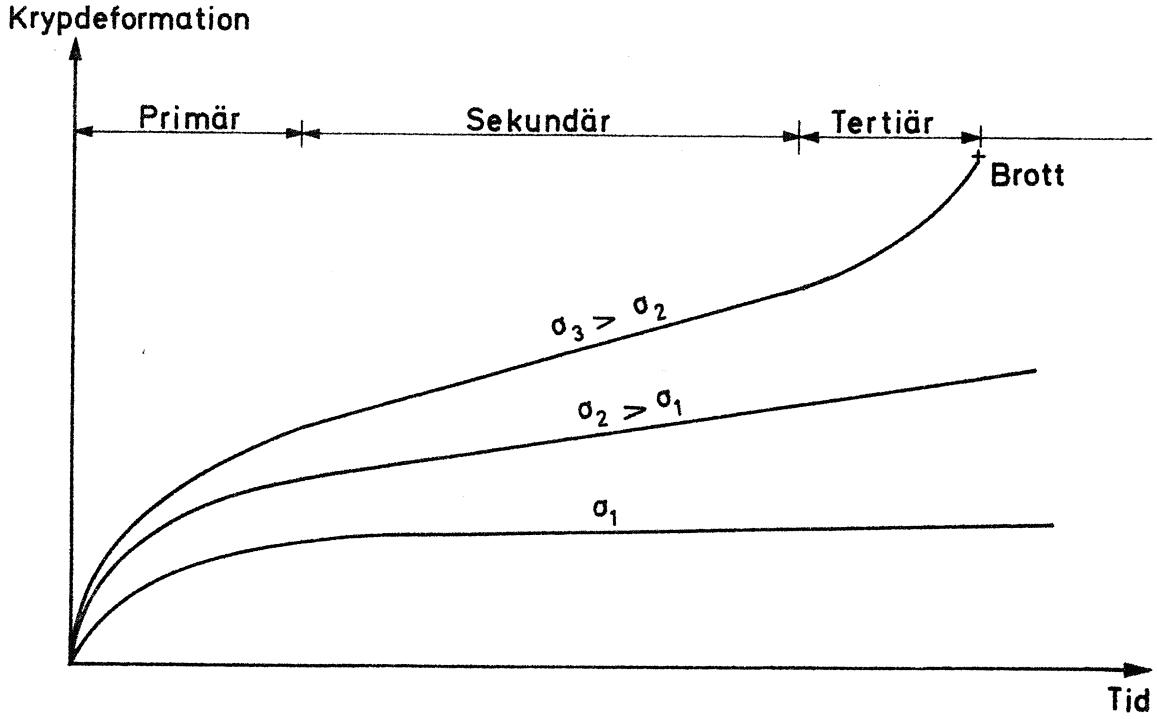


Fig 3.2 Möjliga krypförlopp för ett segt material. σ anger spänningar.

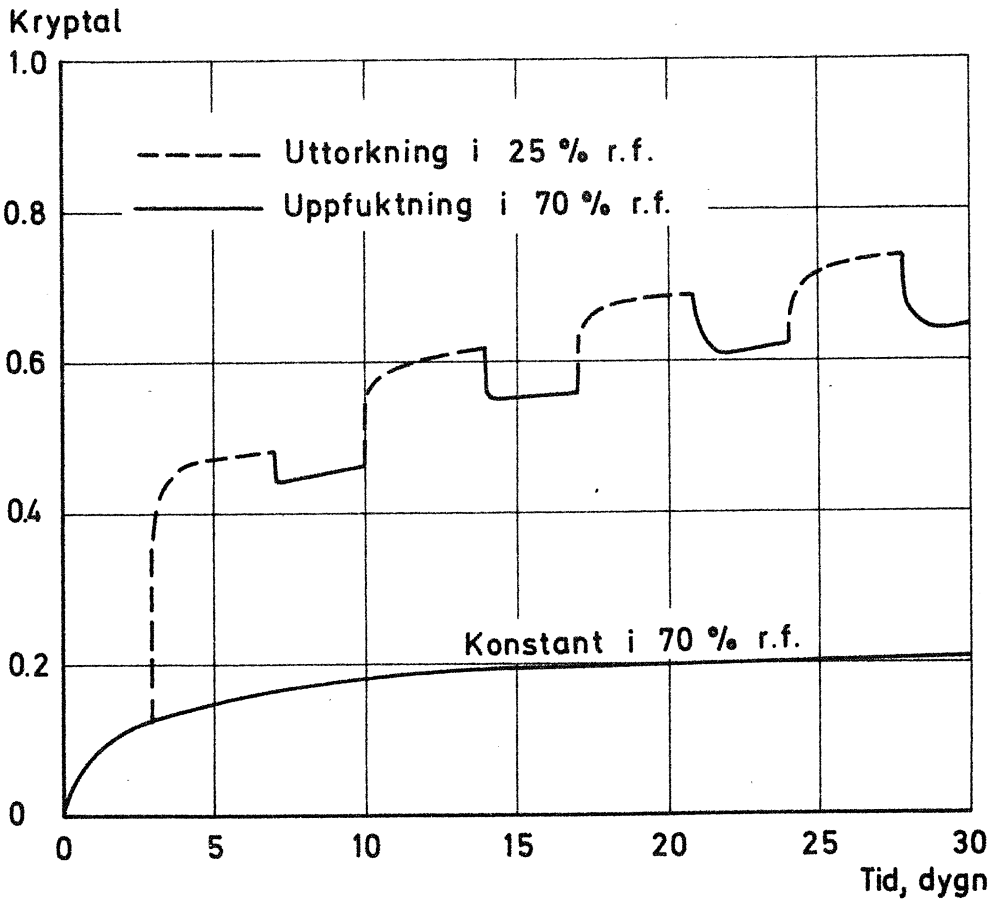


Fig 3.3 Verkningen av fuktvariationer på krypning hos furu. Dragförsök med provstavar om 0.4 · 5 · 150 mm.(Försök av Eriksson och Norén (65) omräknat till kryptal av författaren.)

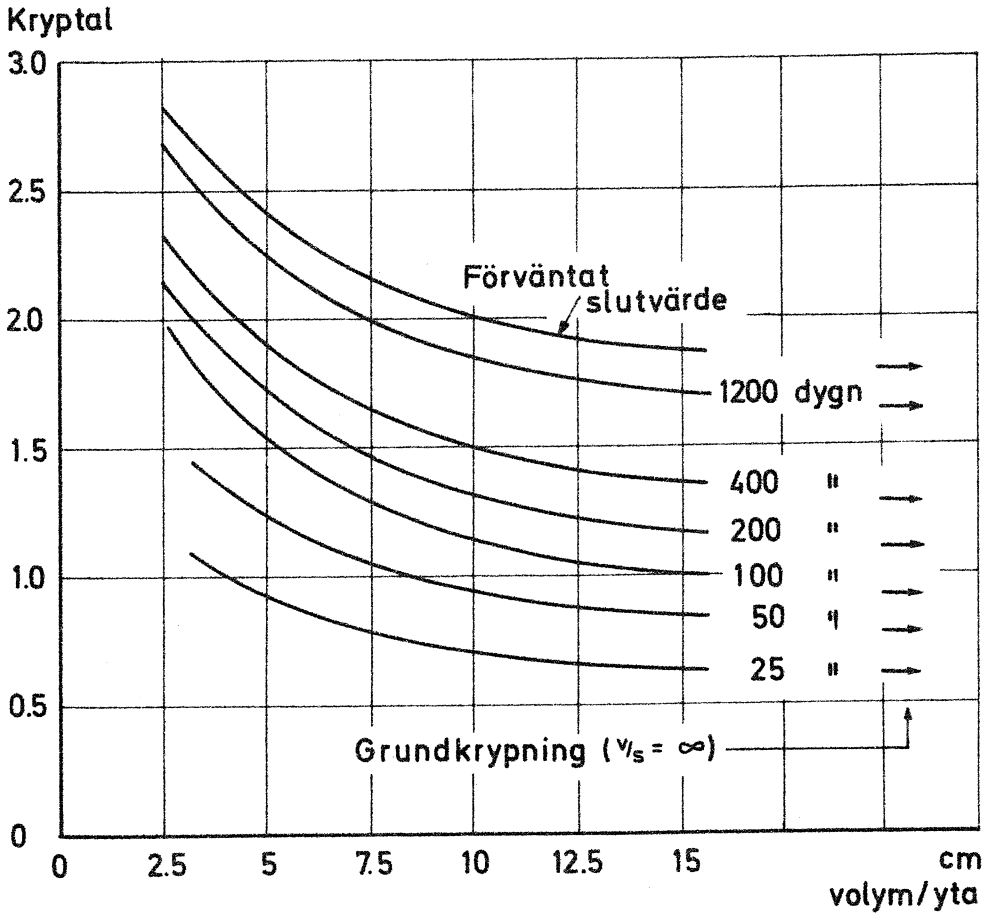


Fig 3.4 Kryptalets variation med volym-yt-förhållandet vid olika åldrar. Betongcylinder under tryck."Elgin" grus. Enligt Hansen och Mattock (66).

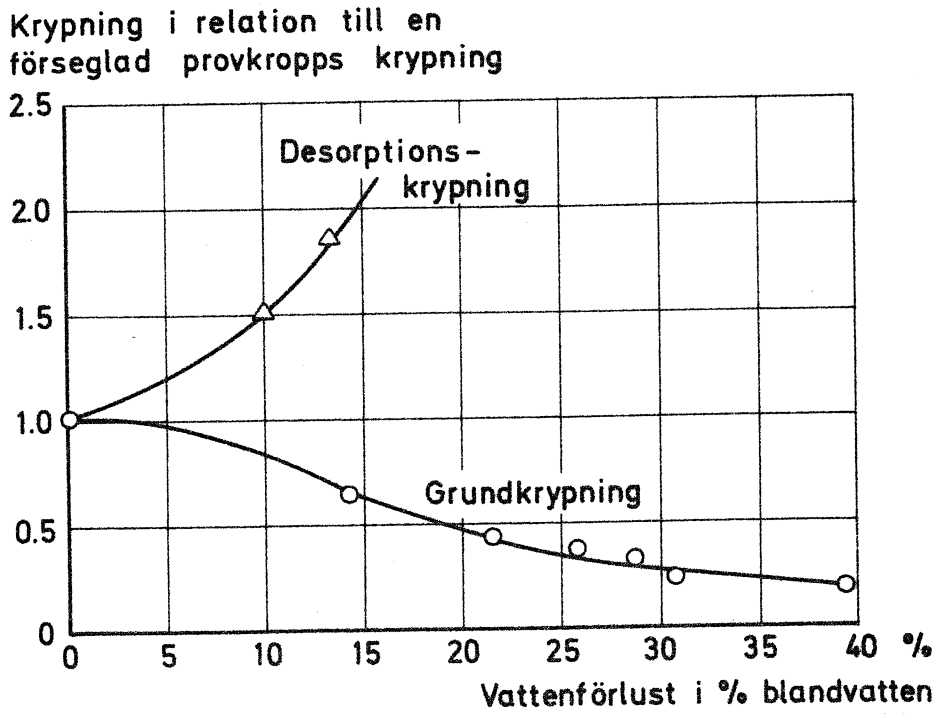


Fig 4.1 Cementpastas krypning: Grundkrypning vid olika vattenhalter och krypning under uttorkning till samma vattenhalter. Enligt Ruetz (66).

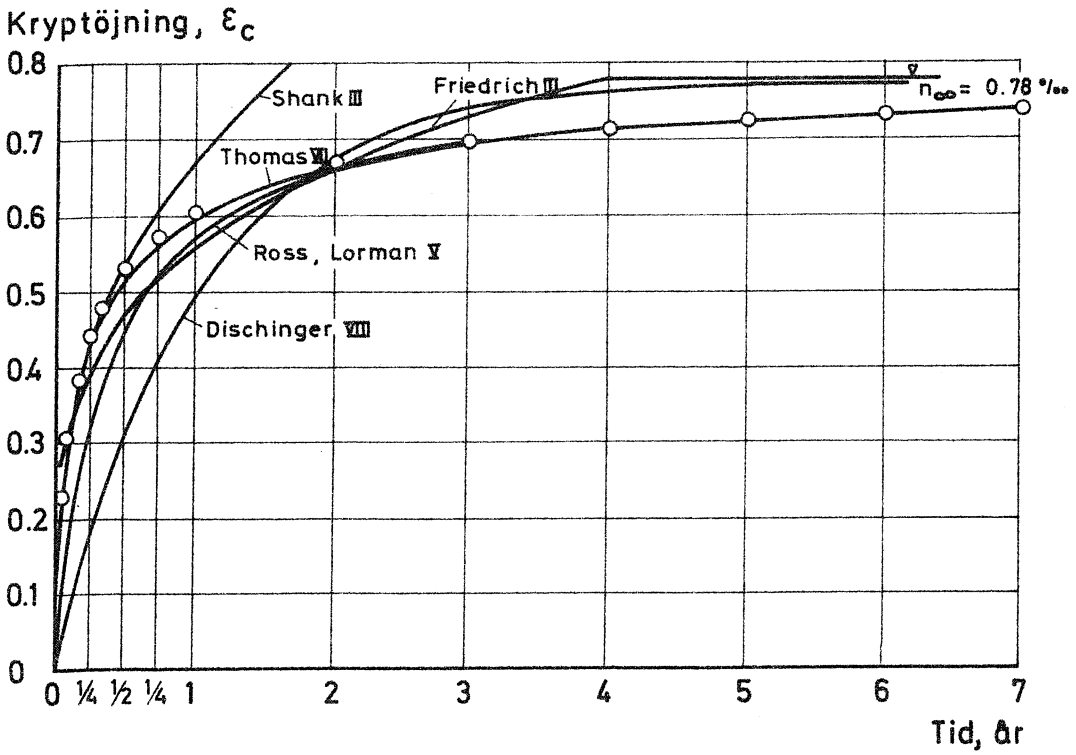


Fig 4.2 Beskrivning av ett krypförsök av Glanville med sex olika kryputtryck. Enligt Wagner (58). Romerska siffror avser ekvationstyp i tabell 1.

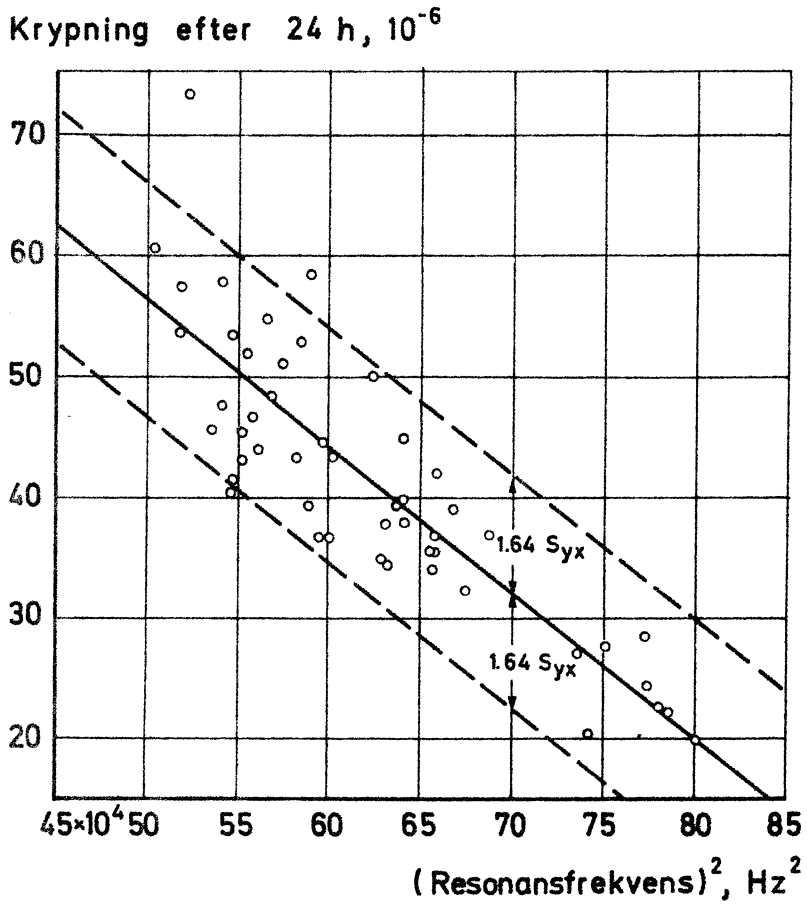


Fig 4.3 Samband mellan krypning efter ett dygn och resonansfrekvens kvadrat, ($f^2 = g(E/\gamma)$. Försök på Douglasgran av Miller och Benicak (67).

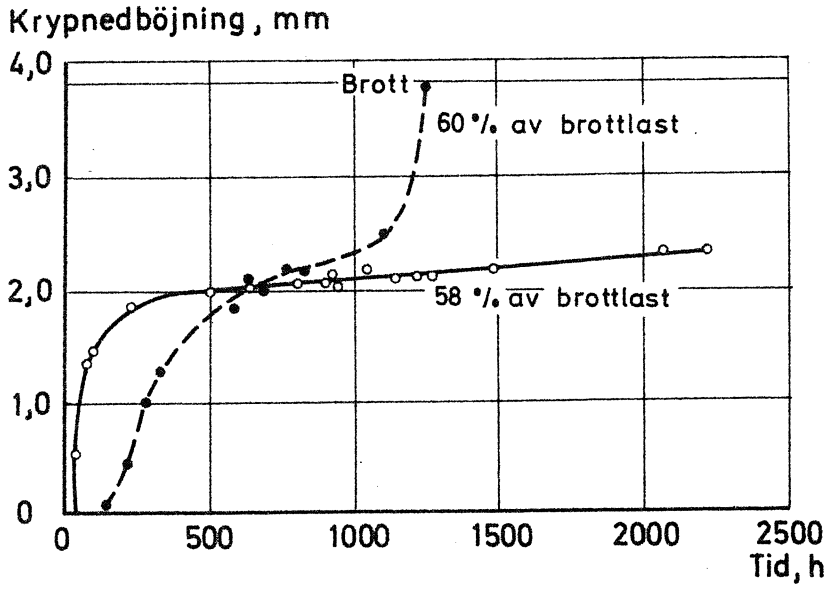


Fig 4.4 Krypkurvor för balsaträ. Försök av Draffin och Mühlenbruch återgivet efter Kollmann (51).

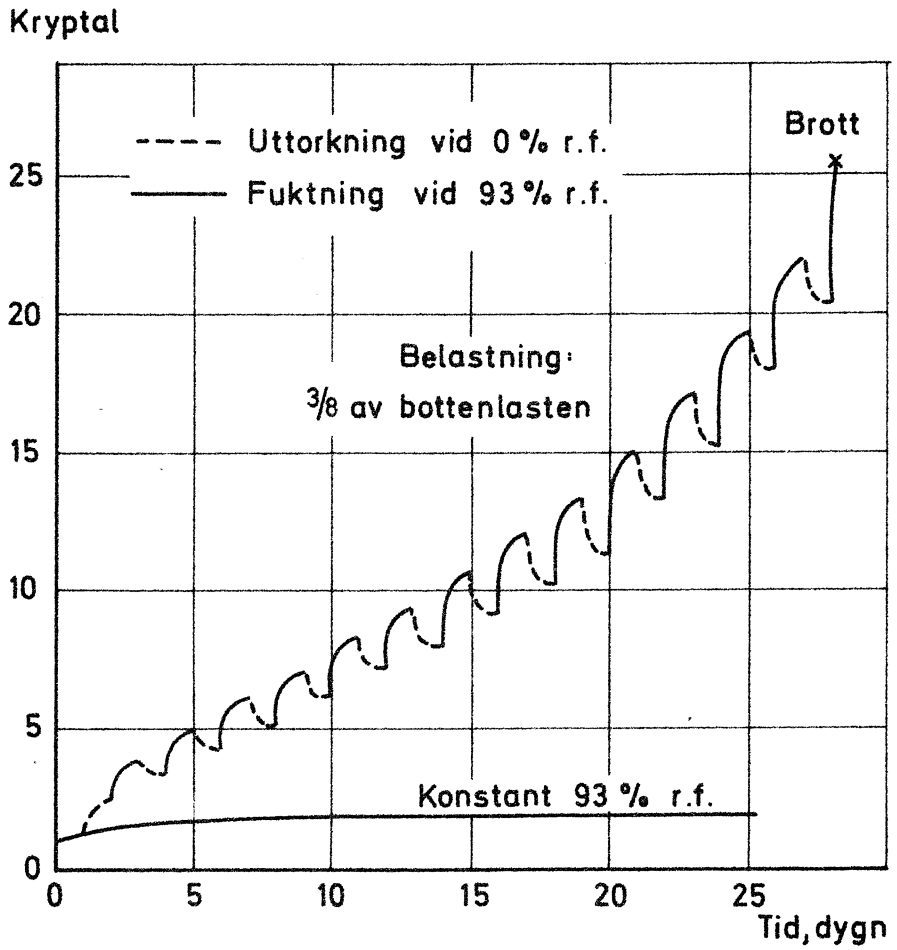


Fig 4.5 Verkningen av fuktvariationer på krypning hos bok. Böjförsök med stavar om 2 · 2 · 60 mm. Försök av Hearmon och Paton (64).

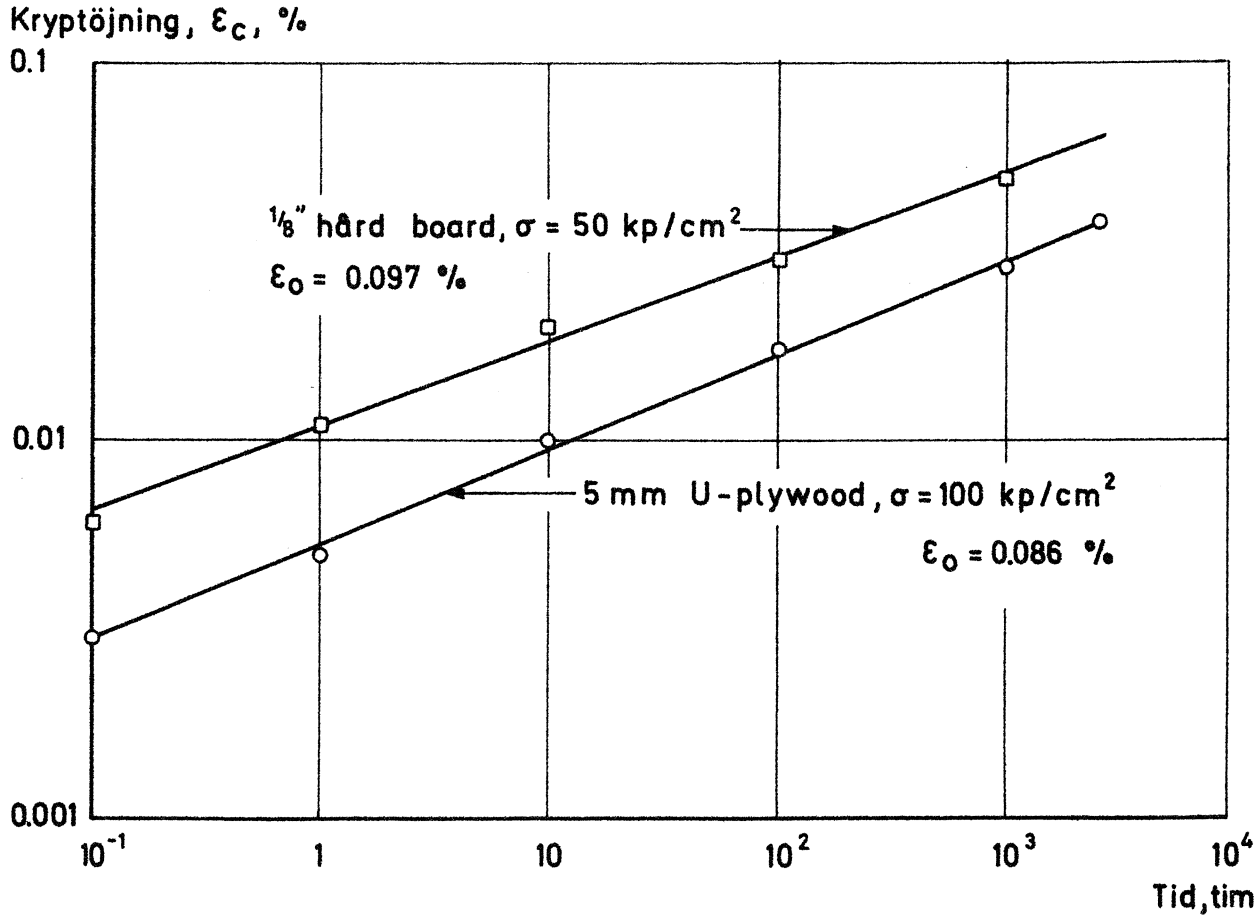


Fig 4.6 Krypkurvor för 5 mm U-plywood och 1/8" hård board. Enligt Lundgren (68). Spänningarna avser dragbelastning.

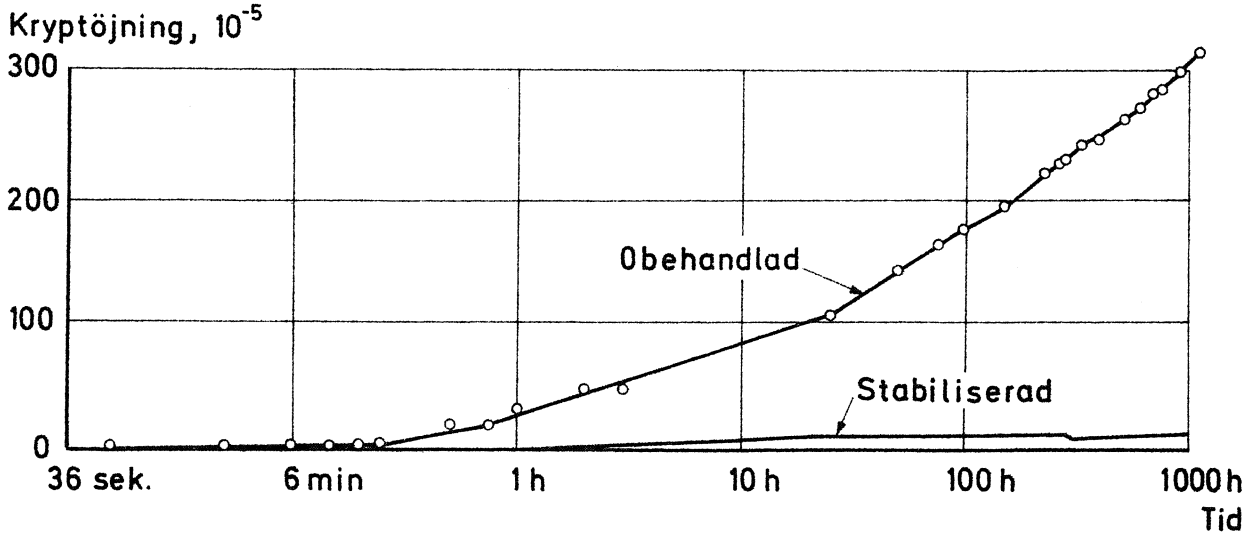


Fig 4.7 Krypkurvor för 7 mm förspänningstråd provad vid 250 C med spänningen 143 kp/mm^2. Försök av Dumas redovisade av Mihajlov (68),

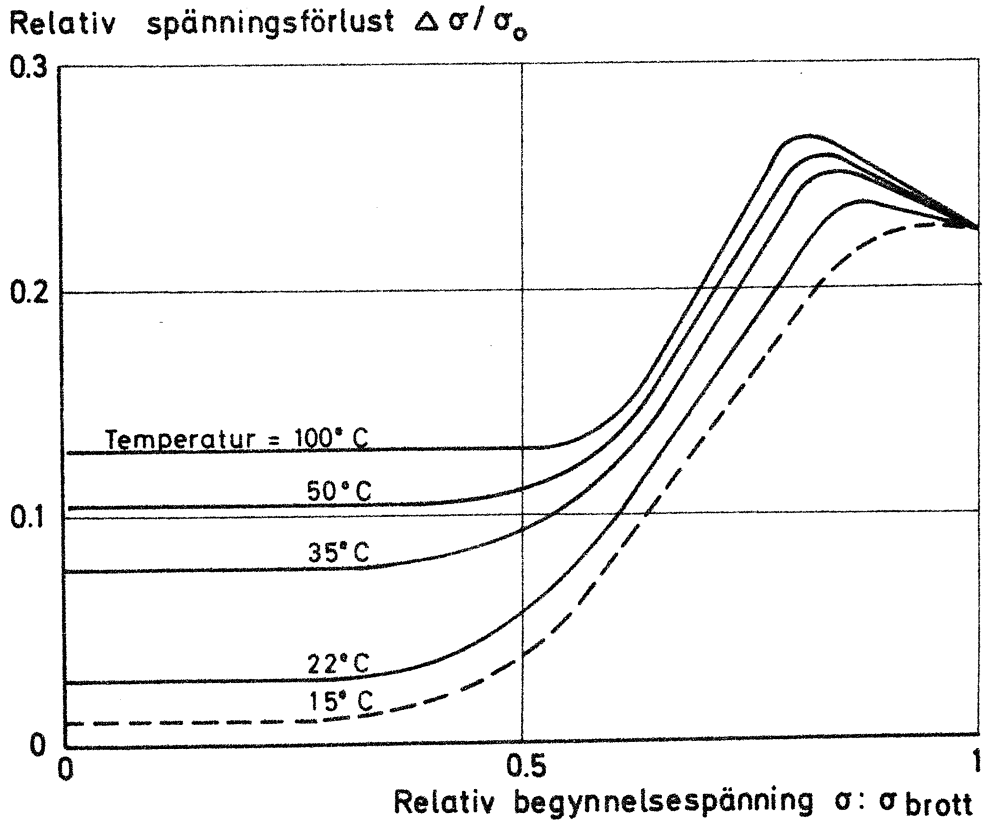


Fig 4.8 Spänningsrelaxation efter 10^6 tim (114 år) vid olika temperaturer under belastningstiden som funktion av begynnelsespänningen. Försök av Papsdorf och Schwier, återgivet efter Bjuggren (63).

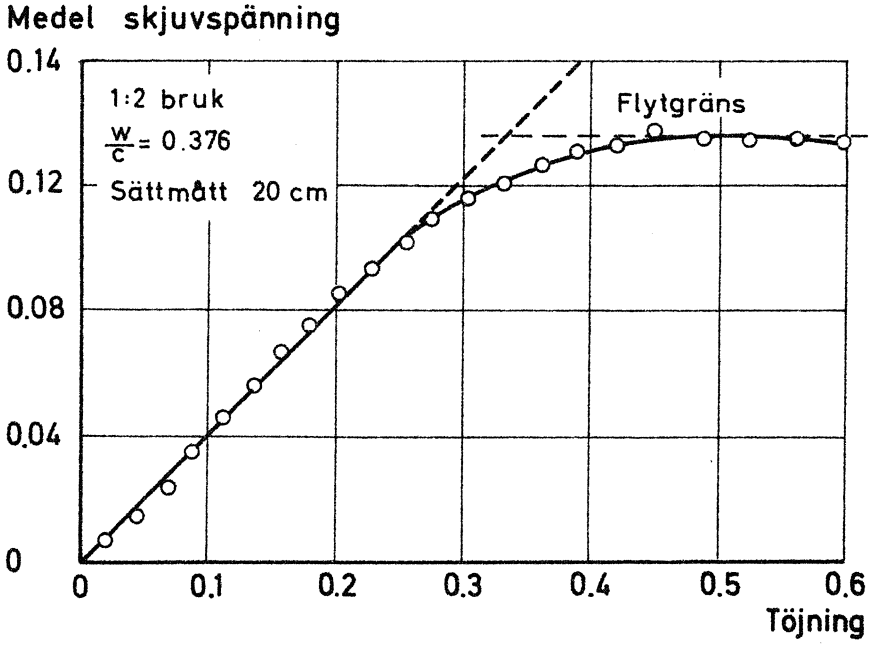


Fig 4.9 Arbetskurva för färskt bruk upptaget med viskosimeter. Enligt Powers (66).