

Krympning hos betong med krossad ballast

- Slutrapport



Dr Hans-Erik Gram

Projektledare FoU
Cementa AB
Stockholm

Dr Mats Emborg

Professor LTU
Konstruktionsteknik
Luleå Tekniska Universitet



Förord

Krympning i betong är ett fenomen som påverkar en mängd företeelser i betongen speciellt under den första tiden efter gjutningen. Olika, ofta oväntade, rörelser kan uppkomma, liksom sprickor och kantresning. Att åtgärda dessa oegentligheter kan bli kostsamma och försena byggandet.

Krympningen framkallas av fuktillståndet i betongen och man skiljer ofta på baskrympning (kemisk krympning/autogen krympning) och uttorkningskrympning där den första beror på cementets tidiga hydratation och den senare på fukttransporten ut från betongen.

Det är av stor vikt att ha kontroll på krympningen så att eventuella åtgärder kan vidtas för att undvika fenomenen ovan. Framförallt bör krympningens hastighet och storlek dokumenteras för den betong som användas om fenomenen ovan är kritiska för aktuell tillämpning.

Denna undersökning har genomförts som en del i ett nationellt projekt om krossad ballast i betong i regi av MinBaS (Mineral, Ballast Sten, MinBaS II). Delen aktualiserar eventuell påverkan på krympningen i betongen om man går över till krossad ballast.

Huvudfinansiär för denna del har varit SBUF.

Arbetet har huvudsakligen genomförts i Cementas laboratorier och resultaten har tjänat som viktigt input till kunskapsbasen gällande krossad ballast i betong. Resultaten kommer även att användas vid framtagande av nya krympmodeller som sker i forskningsprojekt vid Luleå Tekniska Universitet (bl a Crack Free Con projektet).

Liljeholmen och Luleå
September 2012

Hans-Erik Gram Mats Emborg

Sammanfattning

Sex olika krossgrus och ett naturgrus har studerats med avseende på betongs krympning. Undersökningen visar att betong med krossgrus inte krymper signifikant mer än betong med naturgrus. En skillnad i betongrecept mellan krossad fin ballast och naturgrus för att uppnå samma egenskaper har dock noterats i studien. Detta bekräftar tidigare erfarenheter att krossad fin ballast har en betydligt högre fillerhalt än naturgrus vilket troligen också är orsaken till att betong med krossad fin ballast har ett betydligt större flytmedelsbehov och luftporbilda-behov än betong med naturgrus.

Summary

Six different crushed sands and one sand of natural type have been studied with regard to shrinkage. The tests show that concrete with crushed aggregate does not shrink significantly more than concrete with natural aggregate. A difference in concrete mixture is observed confirming earlier experience that crushed fine sand has a considerable higher filler content than natural sand. This is probably also the reason why a higher content of superplasticiser (and air entraining agent) is needed.

Innehållsförteckning

1. Allmänt.....	4
2. Typer av krympning, mekanismer och åtgärder.....	4
2.1 Kemisk krympning, autogen krympning, baskrympning.....	4
2.2 Uttorkningskrympning	5
2.3 Effekter av krympning – generella praktiska åtgärder för moderna betonger	5
3. Effekt av ballast.....	6
3.1 Inledande konstaterande	6
3.2 Krympning och dess modellering	6
3.3 Referenskrympningen	6
3.4 Ballastens indirekta inverkan	8
4. Laboratorieundersökningar	9
4.1 Allmänt.....	9
4.2 Betongsammansättning, provkroppar m m	9
4.3 Resultat.....	10
Referenser.....	13

1. Allmänt

Krympning är en följd av cementpastans sammandragning när vatten lämnar porsystemet samt av hydratationsprodukternas mindre volym jämfört med ursprungsvolymen. Sker volymförändringen utan några inre eller yttre mothållande krafter benämns denna fri krympning och föranledande inga större problem eller konsekvenser för aktuell betongkonstruktion. Om rörelserna är förhindrade eller ojämna i konstruktionen kan effekter och skador uppträda t ex i form av sprickor, rörelser i fogar och kantresning.

Krympningen är ett långsamt förlopp som kan pågå i flera år för många konstruktioner men ca 70 % sker oftast under de första tre månaderna. Krympningens storlek och hastighet beror på en mängd faktorer: betongmaterialet, betongtemperaturen, omgivningens relativa fuktighet, betongens ålder då uttorkning startar m m. Betongens kvalitet dvs. dess sammansättning och vattencementtal har stor inverkan. Vanligtvis minskar slutkrympningen med ökande *vct*. Betong av högre kvalitet är därför mer sprickbenägen pga. krympning. Ett för högt *vct* är inte heller optimalt i många applikationer då detta resulterar i ökad och snabb uttorkningskrympning, sämre slitstyrka och täthet samt svagare hållfasthet.

2. Typer av krympning, mekanismer och åtgärder

2.1 Kemisk krympning, autogen krympning, baskrympning

I all betong sker en kemisk krympning i och med att hydratationsprodukterna blir 8 – 10 % mindre än den totala volymen av cement och vatten. Den kemiska krympningen kan ske fritt i den färska betongen men vid betongens tillstyvnande förhindras kontraktionen delvis av det skelett som formas av cementpastan under hydratationen. Den yttre observerade krympningen hos betongen är därför mindre än den totala kemiska krympningen, se t ex Betonghandboken högpresterande betong.

Den bakomliggande mekanismen för krympning är en inre uttorkning i pastan liknande den vid extern fuktavgång. Detta benämns ofta självuttorkning.

Den inre kontraktionen hos materialet, beroende på minskad volym hos hydratationsprodukterna, benämns alltså kemisk krympning medan den yttre observerade krympningen utan fuktutbyte med omgivningen och vid konstant temperatur benämns autogen krympning.

Den autogena krympningen (även benämnd självuttorkningskrympningen, baskrympningen) sker såväl i normalpresterande som i högpresterande betong. I normalpresterande betong innebär självuttorkningen inte någon större reduktion av den relativa fuktigheten i porerna. För högpresterande betong ger självuttorkningen en snabb minskning av relativa fuktigheten i porsystemet. Detta utnyttjas i applikationer där man vill ha en snabb uttorkning dvs. vid golvläggning och efterföljande mattläggning.

2.2 Uttorkningskrympning

Uttorkningskrympning förorsakas av att fukt diffunderar till omgivningen vilket medför en volymminskning till följd av vattenförlust i porerna. En uttorkning av betongen påverkar således den autogena krympningen så att ytterligare kontraktion erhålls.

Krympdeformationerna övergår så småningom till att vara 100 % traditionell uttorkningskrympning som i normala fall utvecklas under mycket lång tid. Denna avtar dock med tiden och når tillslut ett slutvärde. En upptagning av fukt om luftens relativa fuktighet är högre än betongens ger följaktligen upphov till en svällning.

Andelen autogen krympning relativ uttorkningskrympning varierar enligt ovan beroende på om betongen är normalpresterande eller högpresterande samt på geometriska förhållanden (relation volym och yta), omgivningens relativa fuktighet och temperatur m m, se även Betonghandboken - Material (1997).

2.3 Effekter av krympning – generella praktiska åtgärder för moderna betonger

De primära konsekvenserna av tidiga rörelser hos betongen är som nämnts ovan uppsprickning, ytkrackelering, kantresning, rörelser i fogar m m. Praktiska åtgärder för att minimera effekterna diskuteras i Betonghandböckerna – Material, Konstruktion och Arbetsutförande. För högpresterande betong, dvs. faktiskt för betonger med vct så höga som 0,45, inkluderas den autogena krympningen och skillnader i denna mellan olika delar av den nygjutna betongen.

Följande rekommendationer ges för undvikande av effekter av krympning i moderna betonger (vct < 0,45):

- Åstadkom en så homogen betongmassa som möjligt, Därigenom minskas skillnader i autogen krympning.
- Åstadkom så jämn temperatur som möjligt över tvärsnittet, så att den autogena krympningen blir likformig.
- Optimera betongsammansättningen för att nedbringa den autogena krympningen och uttorkningskrympningen. Indikationer i olika studier visar på gynnsam eller menlig effekt av cementtyp, ballast, tillsats av t ex silikastoft och flygaska.

3. Effekt av ballast

3.1 Inledande konstaterande

Eftersom det är cementpastan som krymper enligt ovan kan man betrakta en betong som ett tvåfas-system med cementpastan som den krympande delen och ballasten som den helt opåverkade delen av fuktändringen (vid diffusion och självuttorkning).

Vid en första betraktelse skulle man således kunna konkludera att det inte föreligger någon effekt på krympningen vid variation av ballast. Men så är det inte!

3.2 Krympning och dess modellering

För tvåfas-system bestäms krympningen av volymandelen cementpasta (volymeffekt) och av att ballasten fungerar som mothåll mot krympningen. I Betonghandboken – Material uttrycks detta som en enkel kompositmodell där dragspänningar uppstår i cementpastan och tryckspänningar i ballasten. Beräkningar visar dock att kompositmodellen inte fungerar för vanlig betong med grövre ballast eftersom cementpastan inte kan ta upp dragspänningarna utan spricker upp. Uppsprickningen kan modelleras men detta innebär komplicerade materialmodeller.

Vid krympberäkningar i praktiken betraktas istället en betong utsatt för fri krympning som spänningsfri vilket är helt i linje att man på makronivå (dvs inte på den nivå när man delar upp materialet i ballast, pasta och porer) betraktar betongen som ett homogent material.

Kan man bestämma betongens fria krympning under väldokumenterade förhållanden kan sedan effekter av temperatur, fukt och andra randvillkor modelleras. Den fria krympningen har då karaktären av materialegenskap och mäts på ett standardiserat sätt och modelleras enligt någon metod, se t ex Betonghandboken - Material.

Genom att definiera ett referenstillstånd beträffande fuktlagringstid, omgivande temperatur och fuktighet får man ett värde som mått på betongens fria krympning. Man brukar använda slutvärdet efter oändlig tid för $RH = 50\%$ och $T = 20\text{ °C}$ då uttorkningen starar för en betong som vattenlagrats i 28 dygn. I krympningsmodell korrigeras slutvärdet ϵ_{cs} med hänsyn till givande luftfuktighet och tidsförloppet analyseras i enligt med diffusionsteorin för uttorkning, ett vida använt angreppssätt, se även Betonghandboken - Material:

$$\epsilon_{cs} = \gamma_t \gamma_{RH} \epsilon_{s0}$$

där ϵ_{cs} är yttre fria krympningen, γ_t är en faktor som anger inverkan av tidsförlopp, γ_{RH} är en faktor som beaktar inverkan av relativ fuktighet och ϵ_{s0} är referenskrympningen.

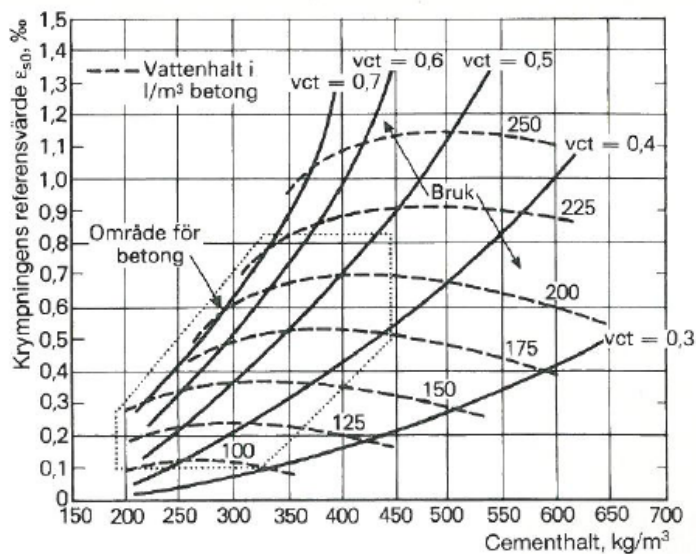
Koefficienterna γ_t och γ_{RH} är relativt enkla att fastställa. Däremot råder stora osäkerheter vid bestämningen av referenskrympningen.

3.3 Referenskrympningen

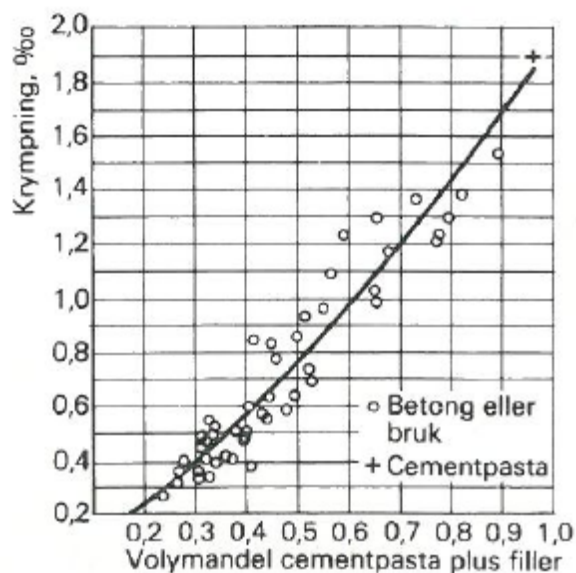
Utgångspunkten vid analys av referenskrympningen är att den är strikt beroende av andelen cementpasta (dvs. volymeffekten) – den krympande andelen. Flera exempel på undersökningar finns t ex i Betonghandboken - Material och på annat håll, där man försöker

få stöd för denna hypotes, se figur 1 – 3 som visar några ”klassiska” diagram. Effekter av cementpasta volym kan observeras liksom inverkan av cementhalt, vattenhalt, vattencementtal etc.

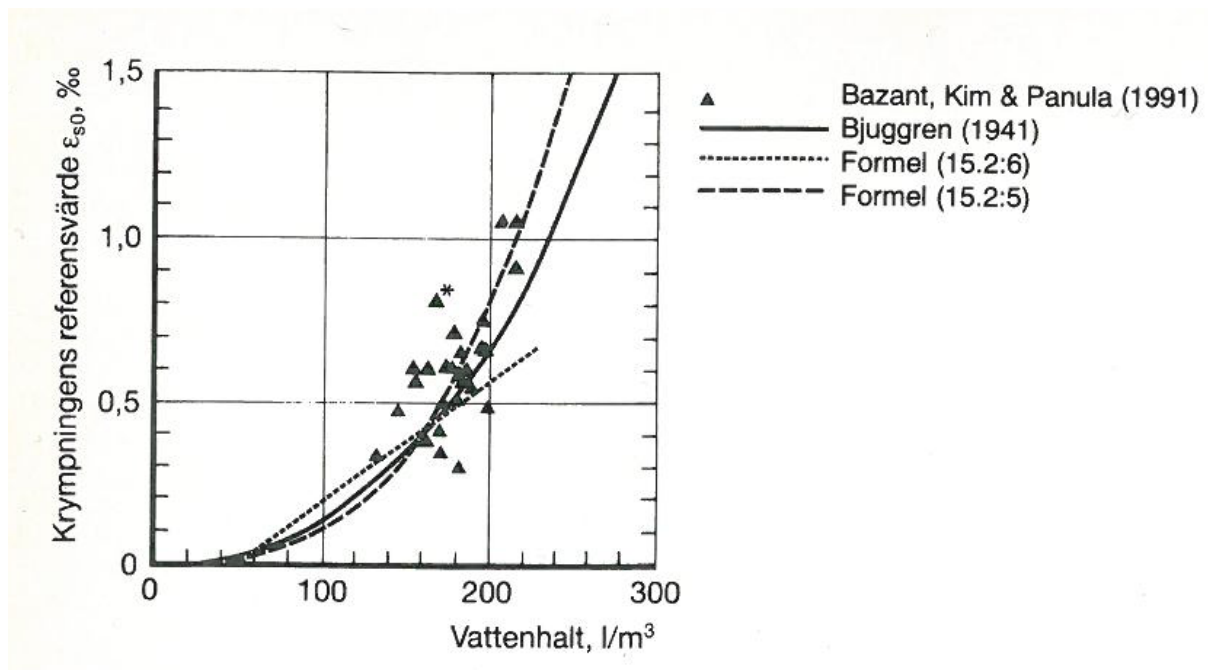
Vattenhaltens stora betydelse framgår av flera nyligt utförda undersökningar och det har tagits fram modeller för denna inverkan och för inverkan av de andra parametrarna som tyvärr är rätt komplicerade. Det konstateras att det inte bara är vattnet som påverkar krympningen, se t ex figur 3.



Figur 1. Krympningens referensvärde som funktion av cementhalt, vattenhalt och vattencementtal, från Betonghandboken – Material.



Figur 2. Krympning för betong, bruk och cementpasta som funktion av volymandel cementpasta plus filler, från Betonghandboken – Material.



Figur 3. Krympningens referensvärde som funktion av betongens vattenhalt. Exempel på mätningar och modellering med tre formler enligt Betonghandboken – Material.

3.4 Ballastens indirekta inverkan

Den direkta inverkan av ballasten enligt tvåfasmodellen är således noll. Men ballasten påverkar en mängd andra faktorer i betongen som får en indirekt inverkan på betongens sammansättning och därigenom krympning. Det är främst konsistensen hos den färska betongen som påverkas av ballastens gradering, kornform och ytråhet. En finkornig ballast med flakig ballast (t ex krossat berg) kräver t ex en större andel cementpasta för att uppfylla krav på rörlighet jämfört med en ballast av naturgrus.

Inom det nyligt genomförda nationella projekt om krossad ballast har studerats inverkan av ballast på betongegenskaperna och speciellt vid övergång till krossad ballast. Här har observerats olika typer av påverkan på egenskaperna inte minst i färskt tillstånd. T ex ger en mer finmald krossad ballast i de flesta fall styvare konsistens i färskt tillstånd mätt t ex med sättmått, flytsättmått eller med reologiska metoder (viskosimeter). En krossad ballast med kantig kornform och ojämn yta, mätt t ex med F-shape index, påverkar rörlighet menligt på samma sätt. Ett flertal rapporter från projektet visar på resultat från heltäckande undersökningar av påverkan vid övergång till krossad ballast med material från en mängd täkter.

Det större vattenbehov/flytmedelsbehov jämfört med en grövre gradering, rundare kornform innebär således att betongsammansättningen måste ändras och då påverkas i slutändan krympningen.

4. Laboratorieundersökningar

4.1 Allmänt

Det inses enligt ovan att det är mycket svårt att täcka in alla tänkbara förändringar av betongsammansättning som kan uppkomma vid övergång till krossad ballast, t ex förändrat behov av cementpasta, vattencementtalförändring, ändring i flytmedelsbehov, ändring av typ av flytmedel, påverkan på lufthalt.

Många av dagens betongsammansättningar innehåller en del krossad ballast, oftast i de grövre fraktionerna. I de flesta fall har naturlig ballast bibehållits i finmaterialet. Intressant är därför att studera en övergång från naturlig ballast till krossad ballast i finfraktionerna och hur den påverkar krympningen.

I samarbete med ett MinBas projekt om krossad ballast har en laboratorieundersökning utförts vid Cementa Researchs laboratorier, Slite.

4.2 Betongsammansättning, provkroppar m m

I undersökningen har studerats ett utbyte av fraktionen 0 – 4 mm (stenmjöl) från naturgrus till krossad ballast för sex olika krossmaterial (exakt samma volym). Ursprungsreceptet var en anläggningsbetong, vct = 0,45, lufttillsats med ett sättmått ca 150 mm med sammansättning enligt figur 4. Det enda som varierades i receptet var således flytmedelsdosen, se figur 5. Jämfört med naturmaterial observeras stora variationer av flytmedelsmängd.

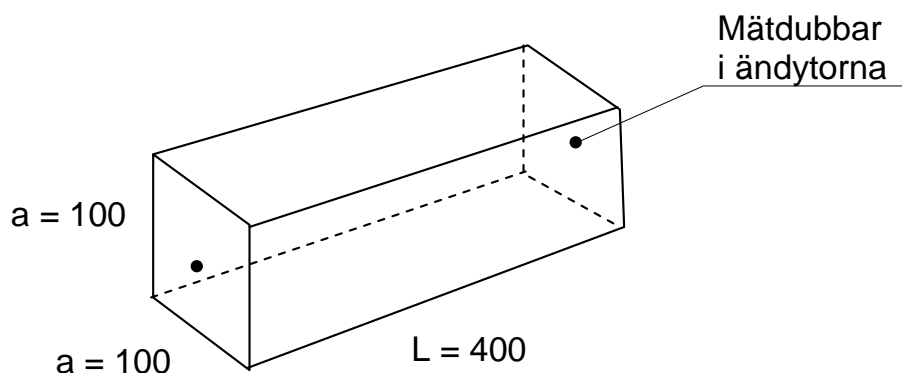
Vikt	Volym	
Cirka 800 kg	304 l Stenmjöl 0-4 mm	} Utbytbart
	41 l luft	
91 kg	34 l Makadam 4-8 mm	} Konstant
823 kg	315 l Makadam 8-16 mm	
180 kg	180 l vatten	
400 kg	125 l Anläggningscement	

Figur 4. Betongsammansättning

Stenmjöl	1	2	3	4	5	6	Naturgrus
Flytdos	4 kg	4 kg	2,67 kg	2,5 kg	1,7 kg	1,6 kg	0,5 kg

Figur 5. Variationer av krossballast och flytmedelsbehov för att uppnå erforderligt sättmått.

I undersökningen användes standardiserade provkroppar och genomförandemetod enligt svensk standard SS 137215, figur 6, vilket innebär vattenlagring i 6 dygn innan placering i klimatrums RH 50 %. Registrering av krympning skedde vid dygn 1, 7, 14, 21, 35, 63, 119, och 231 dygn. Även provkropparnas viktförändring registrerades vid samma tillfällen.



Betong i form under 1 dygn, sedan avformning
 Vattenlagring i 6 dygn
 Sedan i Konditioneringsrum RH + 50%

Mätning 1
 Mätning 2
 Mätning 3-8

Figur 6. Provkroppar och metod för krympmätning enligt SS 137215.

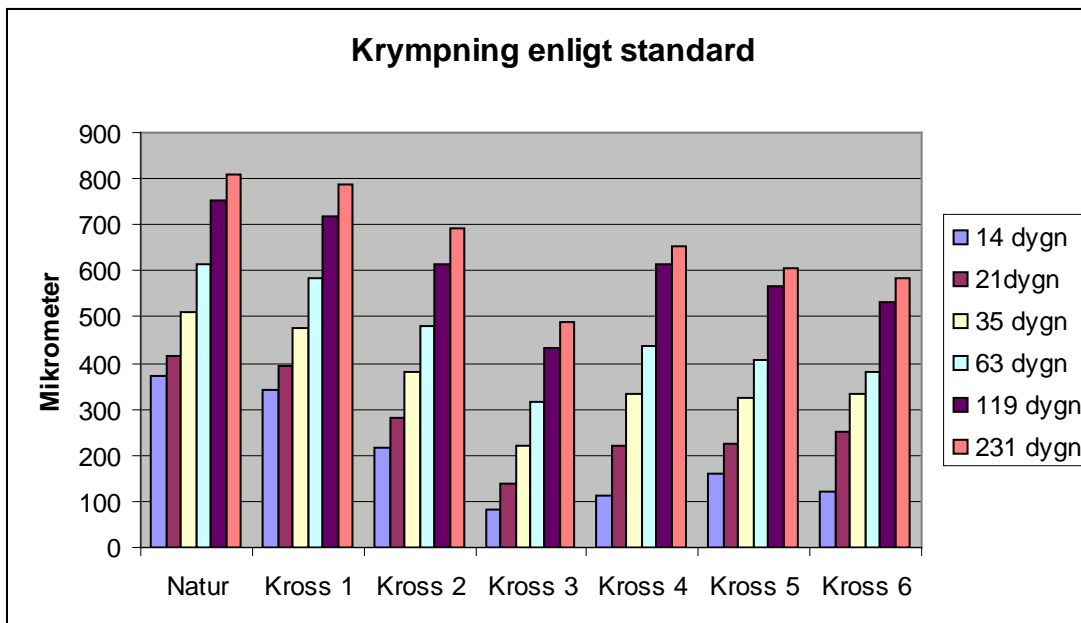
Parallellt med undersökningen av krympning enligt svensk standard studerades också krympningen hos balkar helt förseglade genom pålimmat neoprengummi. Detta limmades på balkarna strax efter avformningen vid 1 dygns ålder. Provkropparnas viktförändring och krympning registrerades även här.

4.3 Resultat

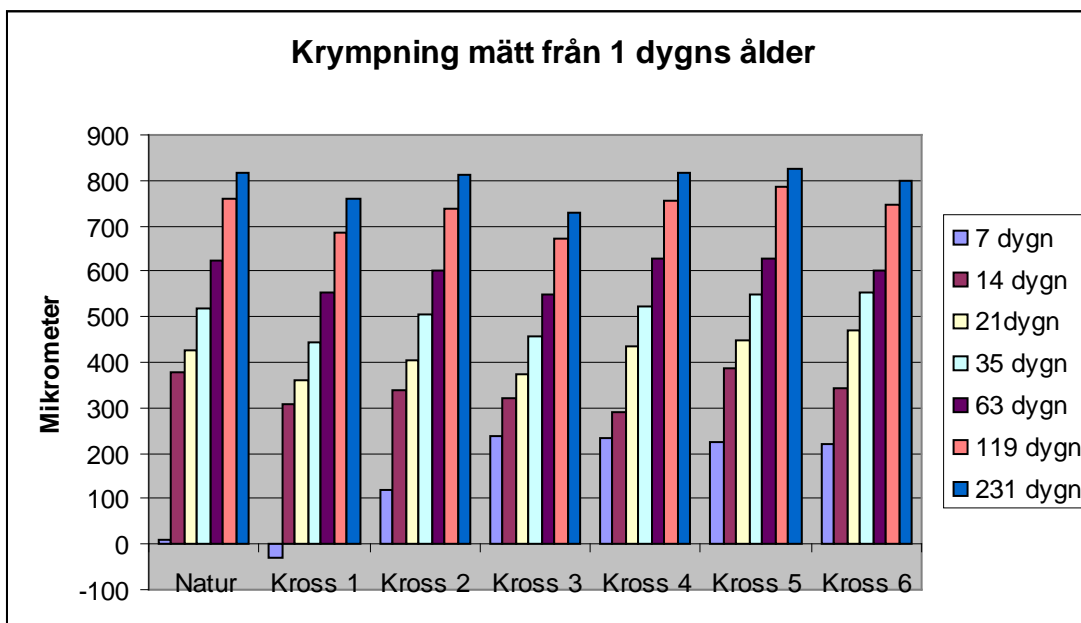
Resultat från försöksserien presenteras i figur 7 - 12. Figur 9 och 10 visar viktminskningen respektive krympningen under de första 230 dygnen. Beträffande viktminskningen observeras ett tydligt vattenupptag under vattenlagringen vid 7 dygnsmätningen. En obetydlig krympning observeras vid samma tidpunkt.

Någon signifikant skillnad mellan betongproverna med de olika krossmaterialen och naturgruset kan inte iaktas vare sig mätningen skett enligt standardmetod eller direkt från 1 dygns ålder. Däremot kan en viss skillnad observeras beträffande baskrympning där betongen med krossballast i några fall är nästan dubbelt så stor som naturgrusproverna.

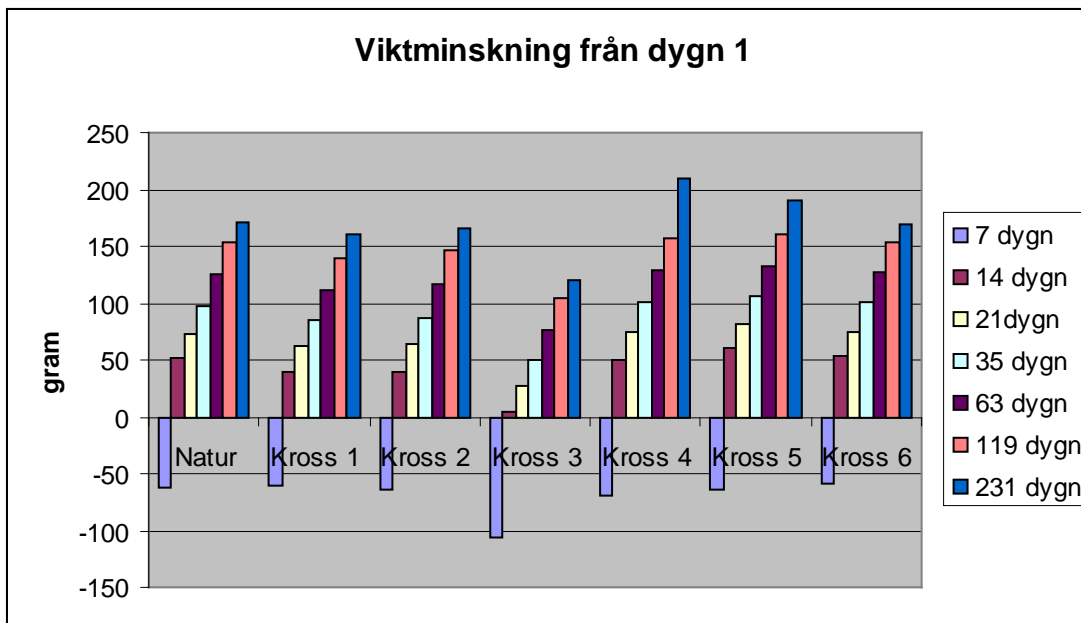
Iaktas viktminskningen från 1 dygn kan inte någon skillnad observeras mellan provkropparna.



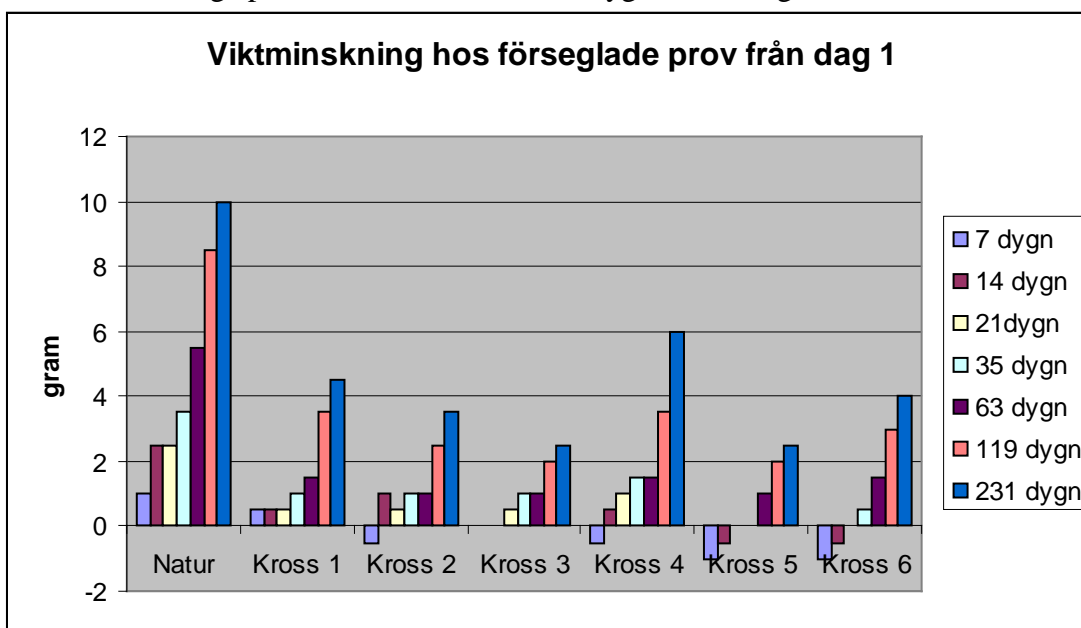
Figur 7. Krympning bestämd enligt svensk standard, dvs mätningen påbörjas det sjunde dygnet.



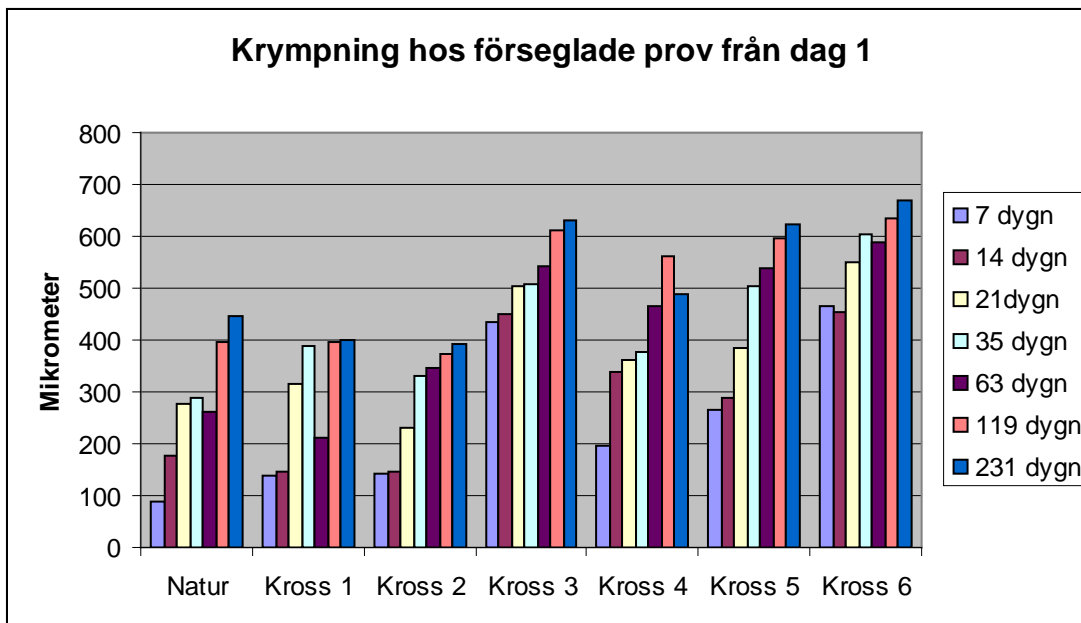
Figur 8. Krympning relaterad till dimensionen vid dag 1, dvs efter avformningen. Notera en liten svällning efter de sex dyggen i vatten för prov tillverkat med kross 1.



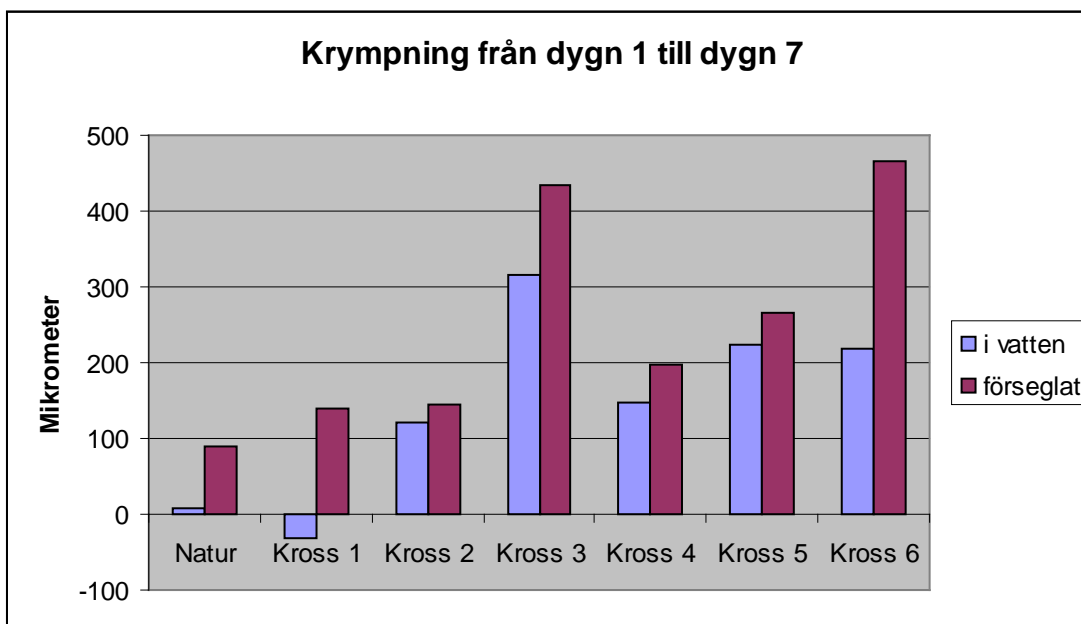
Figur 9. Viktminskning hos krympbalkarna jämfört med den vikt de hade vid avformningen. Notera att samtliga prover ökade i vikt efter 6 dygns förvaring i vatten.



Figur 10. Viktminskning hos förseglade krympbalkar. Dessa har förseglats efter avformningen vid 1 dygns ålder. Notera att balkar tillverkade med naturgrus tappar mest i vikt, troligen på brister i förseglingen.



Figur 11. Krympning relaterad till dimensionen vid dag 1, dvs efter avformningen.



Figur 12. Krympning hos balkarna under de första sex dygnen efter avformning. Förseglade prov krymper mer än prov förvarade i vatten.

Referenser

Betonghandbok - Material (1997), *Betonghandbok - Material*. Solna, Sverige: Svensk byggtjänst. ISBN 91-7332-799-9

Betonghandbok - HPB (2000), *Betonghandbok - Högpresterande betong - Material och utförande*: Svensk byggtjänst. ISBN 91-7332-928-2