BETONG med minskad bindemedelshalt till husgrunder

Dagens husgrunder byggs med kraftig överkapacitet och därigenom med en onödigt hög miljöbelastning. Ny forskning vid Lunds tekniska högskola visar att välfungerade plattor till husgrunder kan byggas med **betongtyper med uppemot 60 procent lägre bindemedelsinnehåll** än vad som är vanligt idag.

TEXT: MIKLÓS MOLNÁR, DAVID WAHLBOM, ALICE SÖRMON & ELIN RYNDAHL

Moderna husgrunder i Sverige byggs ofta med betong i kvalitetsklass C20 eller högre. I enfamiljshus är lasterna från stomme och brukare normalt låga, vilket medför att betongplattors utnyttjandegrad är låg. Vi bygger våra husgrunder med kraftig överkapacitet, vilket innebär att vi orsakar onödiga koldioxidutsläpp och slösar med energi som används för att tillverka cement.

FAKTA

Projektet startade under våren 2022, med finansiellt stöd från Energimyndighetens forskningsprogram E2B2 (anslag P2021-00245). Nordkalk AB har stött projektet med leveranser av kalkstensmjöl. Projektet genomförs vid LTH-s avdelningar för konstruktionsteknik och byggnadsmaterial, med Miklós Molnár som projektledare. I anslutning till forskningsprojektet har två examensarbeten genomförts – *Småhusgrund med cementbundet rivningstegel (2022) och Förankringskapacitet i cementsnåla småhusgrunder (2023).*

Figur 1. Tillverkning av platta av cementbunden makadam. Tvättad makadam 32–64 mm läggs ut i önskad tjocklek (vänster); makadamen infiltreras med lättflytande bruk (höger).

Vi vet samtidigt att under perioder med cementbrist, till exempel under och strax efter andra världskriget, använde man i Sverige betongtyper med betydligt lägre bindemedelshalt. Allteftersom krisen gick över, blev cement ett lättillgängligt och billigt byggmaterial. Kortare produktionstid hamnade i fokus, vilket medförde en utveckling mot mer bindemedelsrika betongtyper. Snabb uttorkning av betongplattan är idag ett styrande kriterium.

Ökade krav på att begränsa byggandets klimatpåverkan har medfört att det idag återigen finns ett starkt intresse för betongtyper med låg bindemedelshalt. Prisutvecklingen är ytterligare en faktor som talar för betong med lägre bindemedelshalt, eftersom både koldioxidlagring (CCS, från engelska *Carbon Capture and Storage*) och införande av alternativa bindemedel förväntas medföra kraftiga prisökningar.

Hur ska man gå till väga för att utveckla betongtyper med låg bindemedelshalt utan att de nya betongtyperna medför nackdelar som längre produktionstid och högre kostnader. Det var en av frågeställningarna som låg bakom ett forskningsprojekt som initierades vid Lunds tekniska högskola (LTH).

TVÅ UTVECKLINGSLINJER

Två olika utvecklingslinjer har testats. Den ena innebär framtagning av traditionellt tillverkad betong med låga halter av bindemedel, den andra användning av cementbunden makadam.

I fallet med traditionellt tillverkad betong har blandningar med en cementhalt på 4,5-8 viktprocent undersökts. För att få en lättbearbetbar konsistens, har lägre halter av bindemedel kompenserats genom tillsats av kalkstensmjöl. Exempel på lyckade blandningar visas i tabell 1.

Tabell 1. Fungerande betongrecept – traditionell betong (C20 – referens), lågcementbetong (C10) och bruk till infiltrering av makadamlager med stenfraktion 32–64 mm, upp till en tjocklek på 400 mm.

Material	Traditionell C20 (kg/m³)	Lågcementbtg. C10 (kg/m³)	Bruk till infiltrering (kg/m³) [1]
Byggcement II Cementa Skövde	320	175	200
Kalkstensmjöl Limus 15 Nordkalk Ignaberga	–	300	680
Tvättad sand 0–2 mm	805	630	1120
Tvättat grus 8–11 mm	979	805	–
Vatten	192	175	286
Flyttillsats ViscoCrete 6730	0,96	1,57	4,0

1. Observera att i cementbunden makadam med stenfraktion 32 – 63 mm utgörs cirka 45 procent av volymen av stenskelett medan återstående 55 procent av bruk.

Cementbunden makadam (CBM) är en mindre vanlig betonglösning i Sverige. Principen bygger på att man lägger ut grovmakadam i önskad tjocklek, varefter man infiltrerar makadamlagret med ett lättflytande bruk (slurry), med gravitation som drivkraft. Injekteringsbetong är ett alternativt begrepp, liksom engelskans preset ballast concrete. Arbetsstegen visas i figur 1 och exempel på lyckade blandningar i tabell 1.

En utmaning med cementbunden makadam är att använda ett bruk som lätt tränger igenom makadamlagret. En avvägning måste göras mellan brukets flytförmåga och risken för separation. När det gäller makadamen, är grov makadam lättare att infiltrera än makadam bestående av finare stenfraktioner. Tvättad och blöt makadam är bättre än torr och otvättad. Tunna makadamlager är lättare att infiltrera än tjocka lager.

I projektet har grovmakadam bestående av stenfraktion 32-64 med tjockleken upp till 400 millimeter infiltrerats på ett effektivt sätt med bruk enligt Tabell 1. Brukets flytmått var över 900 millimeter. Hålvolymen med den aktuella stenfraktionen uppgår till cirka 55 procent, motsvarande en skrymdensitet på cirka 1300 kg/m³.

Observera att i cementbunden makadam med stenfraktion 32-63 mm utgörs cirka 45 procent av volymen av stenskelett medan återstående 55 procent av bruk.

Makadamlager bestående av stenfraktion 16-32 millimeter är svårare att infiltrera med beskrivet bruk. Hypotesen är att sand med kornstorlek mellan 0-1 millimeter kan effektivare fylla ut hålrummen.

I examensarbetet Småhusgrund med cementbundet rivningstegel (2022) undersöktes möjligheterna att använda krossat rivningstegel som ballast. De tekniska utmaningarna ökar allteftersom man ersätter ballast av natursten med ökande andel med rivningstegel.

BETONGHÅLLFASTHET

Ett antal mekaniska egenskaper har bestämts experimentellt, se tabell 2. För den traditionellt blandade betongen medförde en sänkning av cementhalten med 45 procent en sänkning av tryckhållfastheten med cirka 50 procent. När det gäller cementbunden makadam, sänktes cementhalten med 65 procent, vilket medförde en

sänkning av tryckhållfastheten med cirka 55 procent.

Den karakteristiska hållfastheten och elasticitetsmodulen för de traditionellt tillverkade betongsorterna bestämdes på kuber med 150 millimeters sidlängd. När det gäller cementbunden makadam, gjordes detta på kuber med 200 millimeters sidlängd, utifrån tanken att undvika alltför stor påverkan från grov ballast som placeras i en form med förhållandevis begränsad volym. Baserat på erhållna hållfasthetsvärden kan lågcementbetongen klassas som C10 medan den cementbundna makadamen som C9.

Elasticitetsmodulen och brottstukningen bestämdes genom mätningar med hjälp av trådtöjningsgivare. Elasticitetsmodulerna för lågcementbetong och cementbunden makadam, bestämda som sekantmoduler vid en lastnivå motsvarande 60 procent av den maximala lasten, är förhållandevis låga - cirka 8 respektive 5 GPa. Brottstukningen var mellan 5-6‰ och 2,4-4,6‰ för lågcementbetongen respektive den cementbundna makadamen. Resultaten är i linje med internationell erfarenhet.

När det gäller lågcementbetong, kan blandningar med ännu lägre cementhalt produceras. I forskningsprojektet vid LTH har traditionellt blandad betong med hållfasthetsklass C5 kunnat produceras med användning av 105 kg cement per kubikmeter betong.

Tabell 2. Några mekaniska egenskaper för betongtyper med recept enligt tabell 1.

Egenskap	Traditionell betong (C20)	Lågcement-betong (C10)	Cementbunden makadam (C9)
Cementhalt (kg/m³)	320	175	110
Densitet, vid gjutning (kg/m³)	2 390	2 340	2 480
Densitet, vid RF ~50 % (kg/m³)	2 310	2 190	2 360
Karakt. tryckhållfasthet fck,kub, kuber med 150 mm sidlängd (MPa)	26,4	15,0	11,51)
Elasticitetsmodul Esec,06 (GPa)	–	7,8	5,1
Brottstukning (‰)	–	5,0–5,8	2,4–4,6

1. Efter omräkning från observerat värde för kuber med sidlängd 200 mm.

Tabell 3. Några fuktrelaterade egenskaper för betongtyper med recept enligt tabell 1. Mätning på prismor med måtten 100×200×400 mm.

Egenskap	Traditionell betong (C20)	Lågcement-betong (C10)	Cementbunden makadam (C9)
Cementhalt (kg/m³)	320	175	110
Total vattenhalt – uppskattad (kg/m³)	225	209	186
Densitet, vid gjutning (kg/m³)	2 390	2 340	2 480
Densitet, vid RF ~50 % (kg/m³)	2 310	2 190	2 360
Viktförändring, vått till RF ~50 % (%)	3,2	6,2	5,0
Fri krympning, vått till RF ~60 % (‰)	0,50–0,60	0,40–0,45	0,25–0,30

1. Efter omräkning från observerat värde för kuber med sidlängd 200 mm.

FUKTEGENSKAPER OCH KRYMPNING

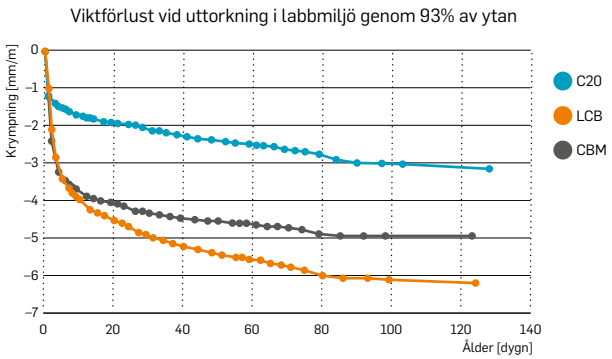
Mätningar av viktförändring och krympning vid uttorkning i labbmiljö genomfördes på prismatiska provkroppar med längd×bredd×höjd på 200×100×400 mm. Provkropparna kunde avge fukt genom alla ytor, utom vid upplaget på 100×200 mm. Temperaturen i labbet varierade mellan 18-22 grader. Den relativa fuktigheten vid början av uttorkningen var kring 60 procent och sjönk allt eftersom till under 30 procent.

Efter 120 dygns uttorkning uppmättes viktförändringen till värden som visas i tabell 3. Total vattenhalt har uppskattats som summan av tillsatt vatten och fukt som uppmättes i sanden (4 %), gruset (0,1 %) och grovmakadamen (0,3 %). Provkropparna förvarades förseglade i formen under ett dygn; därefter placerades dem i labbet för uttorkning. Förloppet avseende uttorkning visas i figur 2.

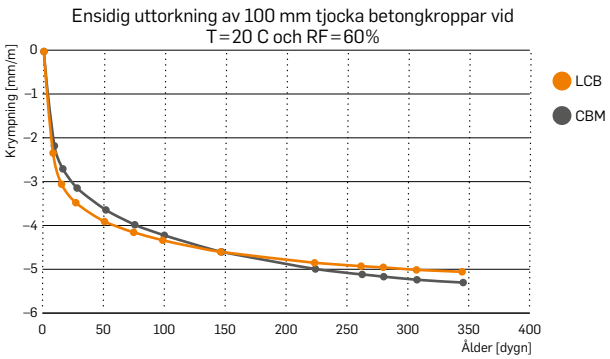
Viktminskningen i de prismatiska provkropparna efter 123-128 dygn var 3,2 procent för den traditionella betongen, 5,0 procent för den cementbundna makadamen och 6,2 procent för lågcementbetongen. För grunder av typen platta på mark är det dock mer relevant att beakta ensidig uttorkning. Figur 3 visar ensidig uttorkning av 100 millimeter tjocka provkroppar av lågcementbetong och cementbunden makadam vid temperaturen 20 grader och relativa fuktigheten 60 procent. Den cementbundna makadamen torkar fortare än lågcementbetongen.

Mätning av krympningen i prismor enligt tabell 3 pågick under cirka 75 dygn, eftersom mätningarna fick avbrytas på grund av ett strömavbrott. Uppmätta värden visas i tabell 3 medan själva krympförloppet i Figur 4. Minst krympning, cirka 0,25-0,30 ‰, konstaterades hos cementbunden makadam. Resultatet var väntat, eftersom grovmakadamen utgör ett styvt skelett som motverkar krympning.

Något mindre väntat, krympte lågcementbetongen (C10) cirka 20-25 mindre än den traditionella betongen (C20). Orsaken är i dagsläget inte klarlagd.



Figur 2. Uttorkningsförlopp i labbmiljö för prismor av traditionell betong (C20), lågcementbetong (LCB) och cementbunden makadam (CBM). Den relativa fuktigheten i labbet sjönk successivt från 60 till under 30 procent.



Figur 3. Ensidig uttorkning av 100 mm tjocka betongkroppar vid temperaturen 20 grader och den relativa fuktigheten 60 procent. LCB – lågcementbetong, CBM – cementbunden makadam.

FÖRANKRINGSKAPACITET

Merparten av enfamiljshusen i Sverige byggs med bärande stomme av trä. Med liten egentyngd ökar behovet av att förankra stommen mot lyftkrafter, vilket normalt görs med betongskruvar. Betongskruvars förankringskapacitet i grunder med lågcementbetong och cementbunden makadam, har därför undersökts experimentellt inom ramen för examensarbetet *Förankringskapacitet i cementsnåla småhusgrunder (2023)*.

Betongskruvar av typen Hus4-H10 från företaget Hilti, med längderna 70, 90 och 100 mm, förankrades i betongkroppar med tjockleken 300 mm. Dragprov genomfördes med en dragprovsapparat från samma företag. Den vanligaste brottmoden var betongkonbrott, följt av utdragsbrott och enstaka betongspjälkbrott. Det inträffade inte några stålbrott. Karakteristiska förankringskapaciteter NRk visas i tabell 4.

Resultaten är i linje med förväntningarna - förankringskapaciteten minskar med betongens tryckhållfasthet och förankringslängden.

Tabell 4. Karakteristisk förankringskapacitet NRk (kN) för infästningar av typen Hus4-H10 (Hilti) i traditionell betong, lågcementbetong och cementbunden makadam. Skruvarnas längd varierar mellan L = 70–100 mm.

Betongtyp	Tryckhållfasthet $f_{ck,kub}$ (MPa)	L = 70 mm (kN)	L = 90 mm (kN)	L = 100 mm (kN)
Traditionell betong (C20)	26,4	16,5	29,1	36,4
Lågcementbetong (C10)	15	12,1	19,1	23,2
Cementbunden makadam (C9)	11,5	8,5	12,9	15,0

1. Efter omräkning från observerat värde för kuber med sidlängd 200 mm.

Tabell 5. Klimatkalkyl med generiska enhetsdata från Boverket, mars 2023. CMB betecknar cementbunden makadam.

Betongtyp	Generiska enhetsdata kg CO_2 – ekv/dm³	Traditionell betong (C20)		Lågcement-betong (C10)		CBM 55 % infiltrerbar hålvolym (C9)	
		Mängd kg/m³	kg CO_2 ekv/m³	Mängd (kg/m³)	kg CO_2 ekv/m³	Mängd (kg/m³)	kg CO_2 ekv/m³
Byggcement II	0,813	320	260,1	175	142,3	110	89,4
Kalkstensmjöl	0,158	–		300	47,4	374	59,1
Sand	0,003	805	2,4	630	1,9	616	1,8
Grus	0,003	979	2,9	805	2,4	–	–
Grovmakadam	0,003					1 300	3,9
Totalt			**265,5**		**194**		**154,2**

KLIMATEFFEKTER

I examensarbetet Förankringskapacitet i cementsnåla småhusgrunder (2023) har en klimatkalkyl gjorts av effekterna av att använda betongtyper med låg cementhalt, se tabell 5. När det gäller koldioxidekvivalenter, har generiska värden i Boverkets klimatdatabas använts för faserna A1-A3.

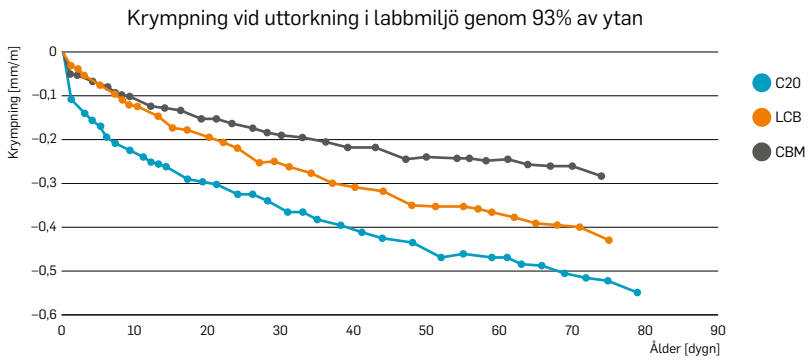
Jämfört med den traditionella betongen (C20) minskade klimatavtrycket i form av koldioxidekvivalenter för lågcementbetong (C10) med 27 procent. För cementbunden makadam (C9) blev motsvarande minskning 42 %. Minskning av cementhalten slår alltså inte igenom i samma utsträckning när det gäller koldioxidekvivalenter, eftersom borttaget cement kompenserades med mer kalkstensmjöl.

LÄRDOMAR OCH MÖJLIGHETER

Det finns goda möjligheter att introducera betongsorter med väsentligt reducerade halter av bindemedel till användning i konstruktioner skyddade från regn och frost. Grunder till småhus är ett område där betong med låg bindemedelshalt kan fungera ändamålsenligt.

I forskningsprojektet vid LTH har betongrecept med cementhalt ända ner till 4,5 viktprocent testats. Minskningen av cementhalten från dagens 12-13 procent med väsentliga besparingar i form av energianvändning och koldioxidekvivalenter. En positiv aspekt med de nya betongtyperna är att uttorkningen går förhållandevis fort.

Ytterligare sänkning av klimatavtrycket kan bli möjlig genom att använda klimatförbättrat cement samt otvättad sand som minskar behovet av kalkstensmjöl. Inblandning av slam från våtsiktning av sand kan utgöra en annan möjlighet att minska behovet av kalkstensmjöl. ■



Figur 4. Krympförlopp i labbmiljö för traditionell betong (C20), lågcementbetong (LCB) och cementbunden makadam (CBM). Den relativa fuktigheten i labbet sjönk successivt från 60 till under 30 procent.

MIKLÓS MOLNÁR
LTH Konstruktionsteknik

DAVID WAHLBOM
WSP, tidigare LTH
Byggnadsmaterial

ALICE SÖRMON
Arup Danmark, tidigare LTH

ELIN RYNDAHL
Skanska, tidigare LTH