

## **Praktiske erfaringer med pakningsberegninger og betonoptimering, herunder design af luft**

Af:

Civilingeniør, Ph.D. Mette Glavind,  
DTI Byggeri, Betoncentret, Dansk Teknologisk Institut

### **Pakning af betonmaterialer**

Undersøgelser af partikelpakning kan defineres som undersøgelser vedrørende udvælgelse af materialer med en passende partikelform og partikelstørrelsesfordeling således, at det sammensatte materiale bliver tæt. Princippet i partikelpakning er, at hulrummene mellem de største partikler udfyldes af de næststørste partikler, og hulrummene mellem de næststørste partikler udfyldes af de tredjestørste partikler og så fremdeles. Ved kombination af to eller flere partikelsystemer er det muligt at opnå en forøgelse af pakningen. Størst forøgelse kan der opnås, hvis der sammensættes partikelsystemer med indbyrdes stor forskel i partikelstørrelse. Sammensættes der omvendt partikelsystemer med omtrent samme partikelstørrelse, vil det derimod kun være muligt at opnå en beskedent forøgelse af det sammensatte partikelsystems pakning.

Ved proportionering af beton vil det umiddelbart være ønskeligt at sammensætte sand- og stenskelettet tættest muligt. Når sand-stenskelettet er sammensat/pakket med et minimalt hulrumsvolumen, minimeres den nødvendige mængde bindemiddel til at udfylde dette hulrum samtidig med, at betonen bibeholder den ønskede bearbejdélighed. Dette medfører, at betonen bliver tættere, mere holdbar og evt. opnår en højere styrke. Derudover medfører en reduktion af mængden af bindemiddel, at størrelsen af svind og krybning mindskes. Vigtigst er det måske, at der også ligger en mulighed for at opnå en økonomisk gevinst under fastholdelse af den friske og hærdnede betons egenskaber. Bedre pakning medfører mindre pasta, hvorved der spares cement.

Ikke blot sand- og stenskelettet kan med fordel sammensættes i henhold til pakningsprincippet, men også de fine partikler, dvs. cement og mikrofillermaterialerne, kan pakkes tæt med en mindskelse af vandbehovet til følge. Det forudsætter imidlertid, at partiklerne dispergeres ordentligt, hvilket gør brug af plastificerende og superplastificerende stoffer nødvendigt, da disse stoffer kan fjerne eller formindske overfladekræfterne. Pakning af de fine partikler i betonen er især betydende for moderne betoner med lave vand/cement forhold, med mineralske tilsætninger og med tilsætning af plastificerende og superplastificerende stoffer.

### **DTI Betoncentrets Pakningsprogram**

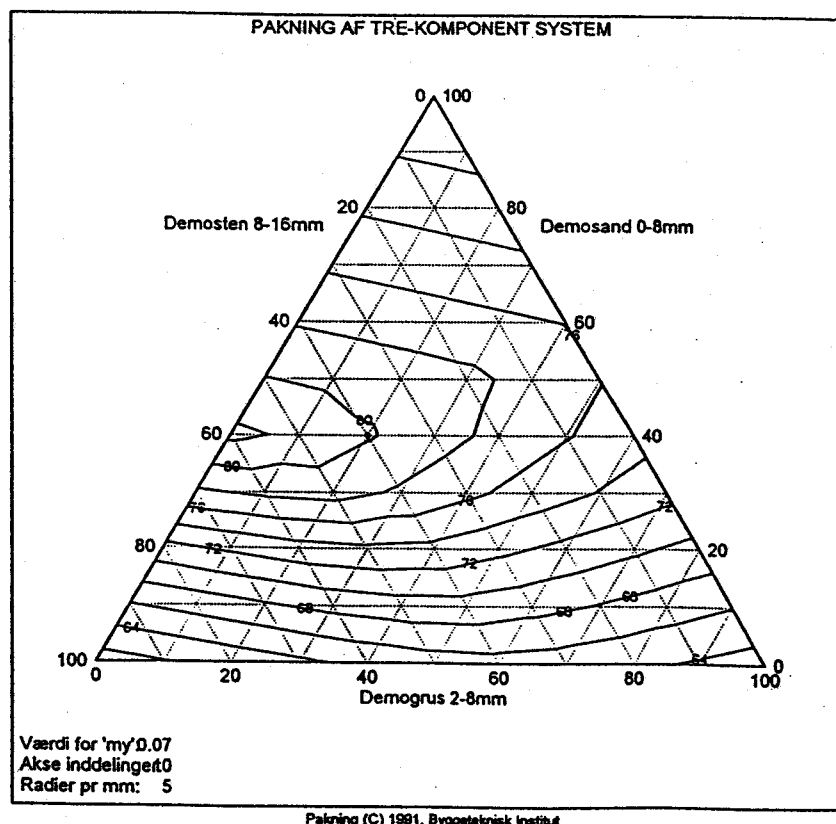
Med kendskab til korndensitet, kornkurve og egenpakning (og dermed kornfaktoren) for hvert materiale kan pakningen beregnes for sammensætningen af flere materialer. Denne procedure er omsat til et kommercielt computer program. Dette program er anvendt til de beregninger, der omtales i nærværende publikation. De nødvendige input til programmet såvel som output er vist i tabel 1. Der er dels input for hvert materiale, der indgår i pakningsanalysen og for hver beregning

	Input	Output
Materiale	Korndensitet Kornkurve Egenpakning	Kornfaktor
Beregning	“my”-værdi Antal inddelinger af kornkurven Antal beregningskombinationer	Pakningsdiagram Sammensat kornkurve

*Tabel 1 Input og output til pakningsprogram*

Densiteten og kornkurven behøver ikke yderligere forklaring. Egenpakningen måles eksperimentelt i laboratoriet. “my”-værdien har sammenhæng med et interaktionsfænomen og indgår i kalibreringen af modellen. De to sidste parametre i input-siden er betydende for nøjagtigheden af beregningerne.

På figur 1 er vist en udskrift af resultatet af en pakningsberegning for tre materialer. Resultatet er vist som niveaurkurver for pakningen i volumen %. Materialekombinationen tilhørende et punkt i diagrammet aflæses på følgende måde. Hvis man følger trekantens kanter mod uret, aflæses volumen % af et materiale af en linie parallelt med den foregående akse. Det afmærkede punkt med en pakning på 80 % forekommer f.eks. ved en sammensætning af 20 volumen % Demogrus 2-8 mm, 40 volumen % Demosand 0-8 mm og 40 volumen % Demosten 8-16 mm.



*Figur 1 Pakningsberegning af tre tilslagsmaterialer*

## **Praktiske anvendelser af pakningsberegninger**

Pakningsberegninger kan anvendes som et hjælpemiddel i forbindelse med betonproportionering (indkøring af nye recepter og/eller materialer, optimering af eksisterende recepter) til:

- 1) Valg af tilslagstyper og -mængder
- 2) Valg af pastaindhold
- 3) Design af luftporestruktur

Ad 1)

Pakningsberegninger kan anvendes i forbindelse med valg af tilslagstyper og mængder. Valget kan foretages ud fra enten at opnå den tættest mulige pakning med de tekniske og økonomiske fordele dette indebærer jf. tidligere beskrevet, eller at opnå den pakning der passer til et krævet pastaindhold og/eller opnå en tilslagskombination, der ligger i et mindre følsomt område af pakningstrekanten. Med et følsomt område menes et område, hvor niveau-kurverne for pakningen ligger tæt således, at små variationer i tilslaget resulterer i store variationer i pakningen og dermed i betonegenskaberne. Det følsomme område er typisk områder med en stor mængde store sten, se figur 1.

Selvfølgelig er der også andre hensyn at tage som krav til max. stenstørrelse, krav om en bestemt miljøklasse, tilslag mm.

Ad 2)

Når tilslaget er valgt - og dermed en bestemt pakning - kan mængden af pasta vælges således, at den passer til hulrummet imellem tilslaget. Der skal dog typisk anvendes ca. ~1~4 % mere pasta, hvilket kan forklares med, at hver tilslagspartikel overtrækkes med et tyndt lag pasta og således ikke ligger i kontakt som forudsat ved pakningsberegningen. Derudover skal der tages hensyn til luft således, at mængden af pasta i vol. % tilnærmelsesvis kan beregnes som:  $1 - \text{pakning-luft} + (1-4)$ .

Ad 3)

Design af luftporestruktur er omtalt andetsteds i informationspakken og vil ikke blive omtalt yderligere her.

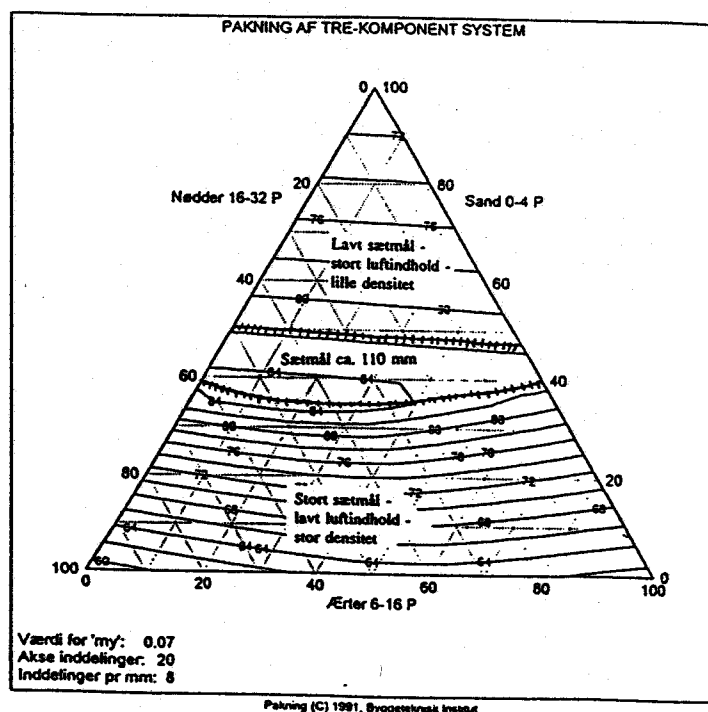
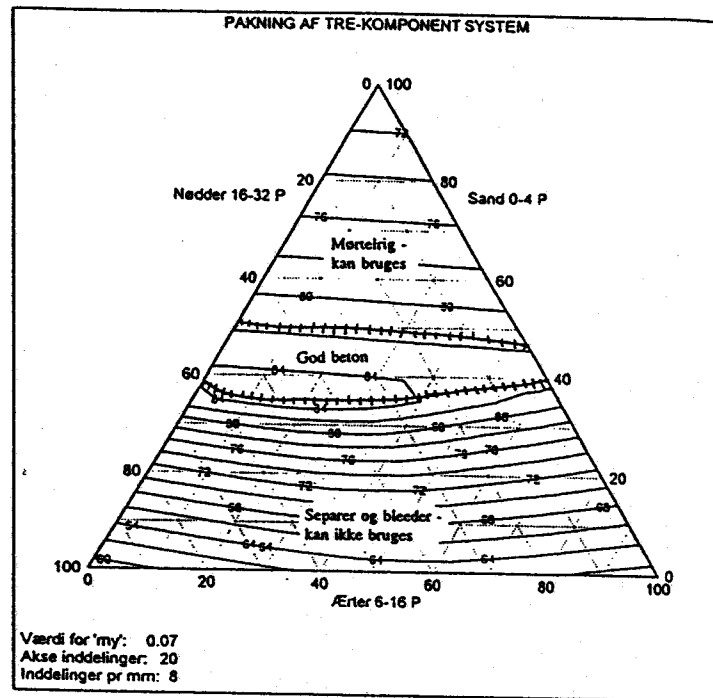
Praktiske erfaringer med pakningsberegninger af tilslaget i fungerende betoner, der er sammensat på baggrund af erfarings- og tommelfingerregler viser, at den anvendte tilslagskombination er i overensstemmelse med optimum i pakningsdiagrammet eller lidt over optimum svarende til en mere sandrig beton og at den anvendte pastamængde tilnærmelsesvis svarer til det hulrum, der er tilbage jf. den teoretiske pakningsberegning.

## **Eksempel på sammenhæng mellem pakning af tilslagsmateriale og frisk betons egenskaber**

Følgende er en summering af forsøg udført i laboratoriet med fabriksblandet beton med henblik på at fastlægge sammenhængen mellem frisk betons egenskaber og pakningen af tilslagsmaterialerne.

Forsøgene er udført ud fra en standardrecept (15 Mpa, klasse P) med fastholdt cement, vand-, luftindblandings- og plastificeringsmængde samt fastholdt mængde af tilslag. Kombinationen af tre typer af tilslagsmaterialer - og dermed pakningen - varieres.

Nedenstående figurer viser områderne i pakningsprogrammet, der resulterer i forskellige egenskaber af den friske beton.



Figur Visuel vurdering af frisk beton og frisk betons egenskaber

Det kan ses af figurerne, at de tilslagskombinationer, der resulterer i en god og udstøbelig beton ligger i og lidt over optimum for pakningen. Det nederste område i pakningsdiagrammet skal man holde sig langt væk fra. Her fås en mere eller mindre separeret beton med et lille luftindhold og et meget stort sætmål eller udbredelsesmål. Niveaukurverne i det omtalte område ligger også tæt, hvilket betyder, at en lille variation i tilslagskombinationen resulterer i store ændringer i tilslagets pakning og dermed i betonernes egenskaber.

Det er knapt så farligt at bevæge sig ind i det mere mørtelrige område, hvor betonerne har et relativt stort luftindhold og et lille sætmål. Betonerne er bearbejdelige og kan udstøbes uden problemer.

De tilslagskombinationer, der resulterer i en dårlig beton, svarer nogenlunde til områderne med så lille en pakning, at der er underskud af pasta i betonen. Indholdet af pasta, inkl. ca. 2 vol. % luft, udgør 24 vol. % af betonen.

### Eksempel på optimering af pasta-indhold

En dansk producent, har med succes benyttet pakningskonceptet ved en systematisk gennemgang af betonrecepter til produktion af pæle og trapper. De fleste recepter var fremkommet på baggrund af erfaringer fra ældre recepter, og der var en vis usikkerhed om, hvorvidt betonerne var optimerede med hensyn til indholdet af pasta. Tilslagskombinationer til omkring 20 recepter blev derfor gennemgået ved hjælp af pakningsberegninger. Resultatet af denne undersøgelse viste, at der med de anvendte tilslagsmaterialer, var et meget lille beregnet pastaoverskud i 19 af de i alt 20 recepter. Kun i et tilfælde var det muligt at reducere mængden af pasta i forhold til, hvad der hidtil var blevet benyttet. Eksempel på denne optimering er vist i tabellen.

Indhold	Recept 807 (før) indhold per m <sup>3</sup>	Recept 807 (efter) indhold per m <sup>3</sup>
Cement, liter	123	113
Vand, liter	142	128
Luft + additiver, liter	66	71
Pasta-indhold, liter	331	312
Tilslag i liter	669	688
Pastaoverskud	15.3 %	12.8 %

*Tabel Eksempel på optimering af beton ved hjælp af pakningskoncept - minimering af pastaoverskud.*

### Eksempel på optimering af tilslagsmaterialer

En dansk producent, af blandt andet fabriksbeton, benytter pakningskonceptet ved sammensætning af nye betoner samt ved vurdering af nye tilslagsmaterialer. På et tidspunkt viste det sig gunstigt at skifte fra knust klippegranit til sømaterialer i en given serie af recepter. Der var et ønske om at sammensætte recepten med i alt fire materialefraktioner: 0-4 mm, 4-8 mm, 8-16 mm og 16-32 mm, men der var en vis usikkerhed om,

hvilken kombination, der ville være mest hensigtsmæssig. På grundlag af en serie pakningsberegninger blev der udvalgt en tilslagskombination til brug for prøvestøbning. På baggrund af prøvestøbningen blev der ikke foretaget betydende ændringer i den foreslåede tilslagskombination.

### **Afslutning**

Anvendelsesmulighederne for pakningsberegninger af tilslagsmaterialer er mange, f.eks. til fabriksbeton, betonvarer, betonelementer og betonveje. Derudover kan pakningsberegninger være nyttigt hjælpværktøj for grusproducenter til sammensætning og sortering af grusmaterialer.

Pakningsberegninger skal ses som et fysisk velbegrunderet alternativ eller supplement til traditionelle, empiriske proportioneringsmetoder. Et pakningsdiagram, der viser pakningen af samtlige kombinationer af udvalgte tilslagsmaterialer, giver et godt og overskueligt overblik over mulige tilslags sammensætninger i en beton.