

Pakningsberegninger som hjælpemiddel ved betonproportionering

af Mette Glavind, Teknologisk Institut, Beton
Ingolf Sørensen, Aalborg Portland A/S
Esben Thygesen, Unicon Beton A/S

Emneord: Beton, proportionering, metode, pakning, beregning, tilslag, kornform,
kornfordeling, korngeometri, tilsætningsstof, bearbejdighed, vandbehov, v/c-
forhold, styrke, komprimeringsgrad, densitet.



Introduktion

Pakning er en vigtig egenskab for partikelsystemer. Kontrol af partiklers pakning har stor betydning inden for blandt andet industrier, der beskæftiger sig med keramik, asfalt, pulvermetallurgi og beton.

Pakning er defineret som den volumenfraktion af et system, der optages af faststofpartikler. Pakning kan også defineres som én minus porøsitet.

Undersøgelser af partikelpakning kan defineres som undersøgelser vedrørende udvælgelse af materialer med en passende partikelform og partikelstørrelsesfordeling således, at pakningen af det sammensatte materiale er størst muligt. Pakningsprincippet 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 beskeden forøgelse af det sammensatte partikelsystems pakning.

Der er teoretisk set et uendeligt antal muligheder for sammensætning af materialer til beton, og det er i praksis umuligt at vurdere effekten af alle disse muligheder. Dette er baggrunden for at søge hjælp i pakningsmodeller, der kan beregne pakningen af en hvilken som helst kombination af materialer. Fordelen ved at benytte pakningskonceptet er, at det er baseret på en korrekt fysisk mekanisme i modsætning til de gamle proportioneringsprincipper, der var mere eller mindre empiriske.

Det skal understreges, at pakningsberegninger ikke er et fuldstændigt proportioneringsværktøj, men et hjælpeværktøj, som kan give et overblik over mulige kombinationer af materialer.

Med baggrund i undersøgelser af partikelpakning beskæftiger denne publikation sig med optimering af tilslagsmaterialers sammensætning og optimering af pastamængden i forbindelse med betonproportionering. Undersøgelsen består dels af computerbaserede beregninger dels af laboratoriemæssigt gennemførte forsøg.

Baggrund

Betonproportionering før og nu

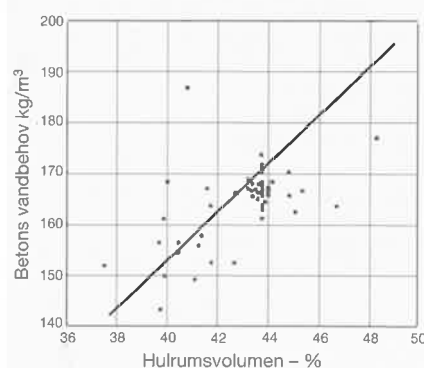
Betonproportionering involverer, at der skal vælges mellem tilgængelige materialetyper og -mængder med det formål at få opfyldt den udførendes krav til den friske betons produktionsegenskaber og bygherrens krav til den hærdnede betons brugsegenskaber. Alt sammen under hensyntagen til økonomien. Der var engang, hvor beton var et rimeligt veldefineret materiale bestående alene af cement, vand, sand og sten i traditionelt bestemte blandingsforhold. Betonen blev proportioneret ud fra en række simple og empiriske håndregler og proportioneringsprincipper, hovedparten med baggrund i praktiske erfaringer. Af disse simple håndregler og principper kan i flæng nævnes: Lyse's lov, Bolomey's formel, Fuller kornkurven og den optimale sandprocent.

De nævnte proportioneringsprincipper anvendes stadig, omend i udvidet og modificeret form, som basis for proportionering af beton. Den typiske fremgangsmåde ved en betonproportionering er at aflæse vandbehov som funktion af sætmål og fastlægge sand- og stensammensætningen ud fra referencekornkurver eller tabeller. Den endelige justering sker gennem prøvestøbninger.

Nutidens – og fremtidens – beton er imidlertid et mere komplekst sammensat materiale end datidens beton. Den kan indeholde mikrosilica, flyveaske og diverse kemiske tilsætningsstoffer. Beton er blevet et højteknologisk materiale. Der kan derfor sættes spørgsmålstegn ved, om de gamle betonteknologiske begreber kan overføres til moderne betoner. Og om begreberne i det hele taget er rimelige at anvende, da de ikke er fysisk velbegrundede.

Pakning af betonmaterialer

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 bearbejdelighed. 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



Figur 1. Relation mellem betons vandbehov og hulrumsvolumen af løst pakket sand, reproduceret fra [1].

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. Figur 1 illustrerer betydningen af sandets pakning. Figuren viser, hvordan betonens vandbehov afhænger af hulrumsvolumenet af sandfraktionen.

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, [2].

Pakningsteori

Historisk gennemgang

Partikelpakning er ikke en ny opfindelse. Allerede i 1907 arbejdede Fuller og Thompson [3] med undersøgelser af betydningen af kornkurvens form og betonens egenskaber baseret på pakningen af delmaterialerne. Suenson [4] fremstillede i 1911 eksperimentelt baserede pakningsdiagrammer, der ligner de trekanter, der er resultat af computerbaserede beregninger, se figur 4. Powers, [5], skal også nævnes for sit omfattende arbejde vedrørende proportionering af beton ud fra pakning af betonmaterialer.

I nyere tid har Bache især været en stærk fortaler for brug af pakningskonceptet inden for betonteknologi, bl.a. i forbindelse med udviklingen af Ny Beton, [6]. Grundlæggende forskning af pakningsteori blev startet af Furnas i 1931, [7]. Hans teori blev opstillet for kugleformede partikler og baseret på den antagelse, at de små partikler udfylder hulrummet mellem de store partikler uden at forstyrre pakningen af de store partikler. Siden Furnas er der sket en udvikling i pakningsmodeller fra alene at omfatte kugleformede partikler, systemer med to eller tre partikelstørrelser uden interaktion til at omfatte systemer med mange partikelstørrelser eller med en kontinuert størrelsesfordeling inkluderende interaktionsfænomener. Det er især udviklingen indenfor computerteknologien, der har

fremmet udviklingen indenfor pakningsmodeller. Det vil føre for vidt at komme ind på samtlige de modeller, der har været foreslået i tidens løb.

Det skal dog nævnes, at der i Danmark udover computermodellen anvendt i denne publikation, eksisterer en anden computermodel til beregning af pakningen af betondelmaterialer [8].

En detaljeret gennemgang af pakningsmodeller kan ses i Larsén [9].

Beskrivelse af den anvendte pakningsmodel

Denne publikation baserer sig på en model udviklet med baggrund i pakningen af et system med to partikelstørrelser, et såkaldt to-komponentsystem, [10]. Modellen er efterfølgende videreudviklet til at medtage en eksperimentelt bestemt egenpakning for hvert materiale, [11].

Den simple teori for pakning af to-komponentsystemer kan summeres på følgende måde. Hvis et to-komponent system betragtes, kan der opstå to forskellige situationer, se figur 2. A) De små partikler er pakket så tæt de kan, og de store partikler er at finde som spredte klumper. B) De store partikler er pakket så tæt de kan, og de små partikler er imellem de store partikler, hvor der er plads.

Pakningen af de to systemer beregnes som vist på figur 2, hvor α angiver den

monodisperse pakning (dvs. den maksimale pakning af partikler med én størrelse, også kaldet kornfaktoren), og ϕ angiver volumendelen af et materiale. I en hvilken som helst to-komponentblanding er enten de små eller de store partikler pakket tættest muligt, (dvs. med den monodisperse pakning) svarende til enten situation A eller B. For at bestemme hvilken situation, der er gældende, beregnes pakningen for de to situationer. Det kan vises, at den minimale af de to løsninger for pakningen er den korrekte. Dette bevis er givet i [10]. Hvis de to værdier for pakningen er ens, er den absolut maksimale pakning opnået.

Princippet kan udvides til at gælde for multikomponentsystemer, dvs. for systemer indeholdende partikler med mange forskellige størrelser. Pakningen kan på samme måde som for to-komponentsystemer beregnes svarende til, at én af partikelstørrelserne er pakket maksimalt, og det kan ligeledes vises, at den korrekte værdi for pakningen svarer til den minimale. Ligning (1) viser, hvordan pakningen beregnes under antagelse af, at den i'te størrelsesfraktion er pakket optimalt i et system med n størrelsesfraktioner.

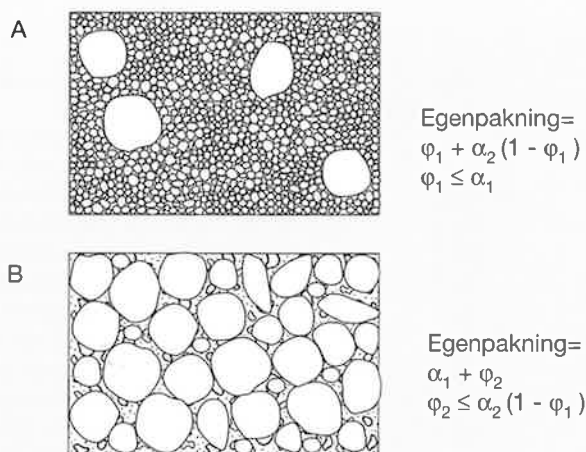
Pakning_i =

$$\alpha_i + (1 - \alpha_i) \sum_{j=1}^{i-1} \phi_j + \sum_{j=i+1}^n \phi_j \quad (1)$$

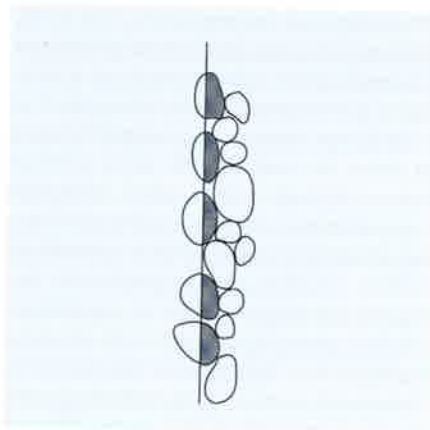
Når størrelsen af to partikelfraktioner ligger tæt, er der interaktion mellem partikelfraktionerne, og pakningen er forskellig fra pakningen beregnet i henhold til ligning (1). Interaktionen kan opdeles i to forskellige fænomener og illustreres bedst ved at betragte et to-komponentsystem.

I situationen vist på figur 2A, hvor de små partikler er pakket så tæt de kan, optræder den såkaldte vægeffekt. Denne effekt kan forklares ved, at de partikler, der ligger op ad en væg (eller en større partikel) ikke kan pakke så optimalt som i midten af beholderen/containeren. Det skraverede areal på figur 3 viser det areal, der, grundet vægeffekten, ikke kan regnes med ved beregning af egenpakningen.

Den anden interaktionseffekt optræder, når de små partikler er så store, at de ikke kan være i hulrummet mellem de store uden at forstyrre pakningen af disse. Denne effekt beskrives bl.a. med en såkaldt "my"-værdi, som angiver det maxi-



Figur 2. Pakningsarrangement af to-komponentsystemer
A. De små partikler er pakket, så tæt de kan.
B. De store partikler er pakket, så tæt de kan.



Figur 3. Illustration af vægeffekt

male størrelsesforhold mellem to partikler, som gør, at de små partikler lige netop kan finde plads mellem de store partikler. "my"-værdien er i princippet uafhængig af absolutte størrelser. Dvs. for samme materialetype bør "my"-værdien være den samme uafhængigt af, om der er tale om sand- eller stenmaterialer. Hvis sidstnævnte effekt beskrives med funktionen $f(i, j)$, og vægeffekten beskrives med funktionen $g(i, j)$, kan ligning (1) til beregning af pakning modificeres til:

Pakning_i =

$$\alpha_i + (1 - \alpha_i) \sum_{j=1}^{i-1} g(i, j) \varphi_j + \sum_{j=i+1}^n f(i, j) \varphi_j \quad (2)$$

For en mere detaljeret gennemgang af formelapparatet til pakningsmodellen henvises til [10].

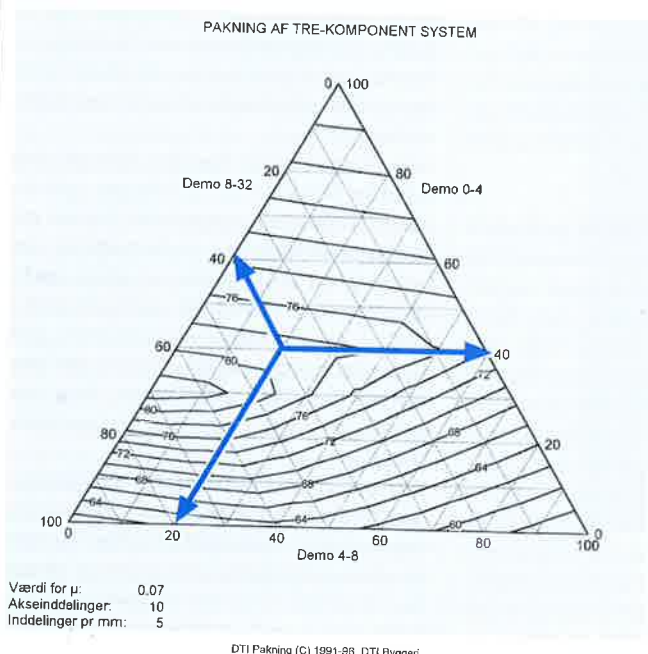
Pakningen af partikler med samme form og størrelse kaldes monodispers pakning, (i det følgende kaldet kornfaktoren), er en væsentlig parameter ved beregningen af pakningen af materialer. For kugleformede partikler er den monodisperse pakning lig 0,60 – 0,64. Formen af tilslagsmaterialer og andre naturligt forekommende materialer er dog ikke ideelt kugleformet, og det må derfor forventes, at kornfaktoren er mindre end kornfaktoren for kugleformede partikler. Det er i praksis umuligt at bestemme kornfaktoren eksperimentelt, og følgende fremgangsmåde kan derfor følges, [11]. For hvert materiale, der indgår i pakningsanalysen, bestemmes eksperimentelt en

egenpakning, se side 5. Med kendskab til kornkurven, der opdeles i et passende antal fraktioner, itereres en kornfaktor, således at den eksperimentelt bestemte og teoretisk beregnede egenpakning stemmer overens. Denne procedure medfører, at modellen, selv om den oprindeligt er udviklet for kugleformede partikler, kan anvendes til ikke-kugleformede partikler.

Kornfaktoren for et materiale vil være mindre end eller lig med egenpakningen for materialet. Hvis materialet kun indeholder partikler med én størrelse, er egenpakningen lig kornfaktoren. Omvendt hvis størrelsesfordelingen af partikler er bred, er der stor forskel på egenpakningen og kornfaktoren. Bemærk at selv om kornfaktoren er en fiktiv størrelse, har den alligevel fysisk betydning, fordi den har

	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.



Figur 4. Pakningsberegning af tre tilslagsmaterialer

sammenhæng med formen af partiklerne, se tabel 2.

Pakningsprogram

Med kendskab til korndensitet, kornkurve og egenpakning (og dermed kornfaktoren) for hvert materiale kan pakningen nu beregnes for sammensætningen af flere materialer. Denne procedure er omset til Teknologisk Institut, Beton's kommercielle computerprogram, [12]. 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. Densiteten og kornkurven behøver ikke yderligere forklaring. Måling af egenpakningen er forklaret i det følgende afsnit om måling af egenpakning. "My"-værdi-

Måling af egenpakning

en har som nævnt sammenhæng med et interaktionsfænomen og indgår i kalibreringen af modellen. Bestemmelse af "my"-værdien omtales i afsnittet om kalibrering og verifikation af modellen. De to sidste parametre i input-siden er betydende for nøjagtigheden af beregningerne, se afsnittet om kalibrering og verifikation af modellen.

På figur 4 er vist en udskrift af resultatet af en pakningsberegning for tre materialer. Resultatet er vist som niveaukurver 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 79 % fremkommer f.eks. ved en sammensætning af 20 volumen % Demo (grus) 4-8 mm, 40 volumen % Demo (sand) 0-4 mm og 40 volumen % Demo (sten) 8-32 mm.

Ekspérimentel bestemmelse af et materiales egenpakning indgår, som beskrevet i forrige afsnit, som et centralt element i den pakningmodel, der beskrives i denne publikation.

Dette afsnit beskriver, hvorledes egenpakningen af et sand- og stenmateriale rent praktisk kan bestemmes eksperimentelt. Desuden beskrives hvilke parametre, der er styrende for bestemmelsen af egenpakningen samt hvilke usikkerheder, der er knyttet til en sådan bestemmelse.

Sand- og stenmaterialers egenpakning beskriver, hvor stort et faststofvolumen et materiale optager i en given beholder – og ved en given pakningsmetode. Egenpakningen kan derfor også beskrives som én minus porøsiteten.

Procedure til bestemmelse af tilslagsmaterialers egenpakning

Der findes ingen standardiseret metode, der er velegnet til bestemmelse af tilslagsmaterialers egenpakning. Med baggrund i adskillige pakningsforsøg er det fundet mest hensigtsmæssigt at pakke tilslagsmaterialer på en sådan måde, at materialerne opnår den tættest mulige pakning (materialerne fylder mindst muligt). Det er fundet, at den maksimale pakning af sand- og stenmaterialer generelt ikke opnås ved påvirkning fra vibration, men derimod ved en kombineret ryste/banke proces, [13].

Påvirkning fra vibration kan forårsage separation og lagdeling i tilslagsmaterialer. En given vibrationspåvirkning vil således ikke påvirke forskellige tilslagsmaterialer til samme grad af pakning. Eksempelvis vil fint sand kunne pakkes tæt ved en vibrationspåvirkning, der vil give lagdeling i groft sand, og som ryster et stenmateriale fra hinanden. Ved eksperimentelle pakningsforsøg kan det således anbefales at benytte nedenstående procedure:

1. Materialet ovntørres ved $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.
2. En repræsentativ prøve udtages.
3. En del af prøven, ca. 1/3, hældes forsigtigt i en målebeholder med kendt volumen (V). Det er vigtigt, at materialet ikke lagdeles ved påfyldning af målebeholderen. For at modvirke dette kan påfyldning med fordel foretages med en ske. Målebeholderen bankes med håndkraft mod et hårdt underlag og rystes, indtil den maksimale pakning er opnået (materialet fylder mindst muligt). Proceduren gentages indtil beholderen er fyldt, hvorefter overfladen afrettes.
4. Beholderen med materialet vejes (m_1).
5. Beholderen uden materialet vejes (m_2).
6. Egenpakningen beregnes på følgende måde

$$\text{Egenpakning} = (m_1 - m_2) / (V \rho)$$

hvor ρ er korndensiteten af materialet. Der udføres i alt tre bestemmelser, og egenpakningen beregnes som middelværdien af de tre målinger.

Det anbefales at benytte en målebeholder med en diameter på mindst 10 gange største partikeldiameter og med en tilsvarende højde for at mindske vægeffekten, se side 3 - 4.

Typiske værdier for egenpakning og kornfaktor

I forbindelse med udarbejdelsen af denne publikation er der foretaget en lang række pakningsundersøgelser på danske tilslagsmaterialer. Tabel 2 giver eksempler på typiske værdier for henholdsvis

Materialenavn	Interval kornstørrelse (mm)	Målt egenpakning	Beregnet kornfaktor
Søsand	0-1	0,62	0,55
Søsand	0-4	0,68	0,55
Bakkesand	0-4	0,66	0,53
Bakkegrus	0-8	0,69	0,53
Søsten	4-8	0,65	0,59
Søsten	8-16	0,62	0,57
Søsten	16-32	0,61	0,56
Bakkesten	4-8	0,60	0,50
Bakkesten	8-16	0,60	0,55
Bakkegranit	6-12	0,59	0,51
Klippegranit	8-16	0,58	0,53

Tabel 2. Typiske værdier for målt egenpakning og beregnet kornfaktor for danske tilslagsmaterialer.

egenpakning og kornfaktor for disse materialer. Kornfaktoren er beskrevet i forrige afsnit. Det kan ses af tabel 2, at en bred kornstørrelsesfordeling generelt resulterer i en stor egenpakning. Derudover kan det ses af tabellen, at kornfaktoren er størst for afrundede partikler (sømaterialer) og mindst for knuste partikler (granit).

Det er tilsyneladende muligt at sammenkoble partiklers kornform med en beregnet kornfaktor. Desto mere afrundede partiklernes kornform er, desto mere nærmer kornfaktoren sig den værdi, der gælder for kugleformede partikler. Der kan dog forekomme undtagelser fra denne regel, idet skarpkantede knuste partikler kan bringes til at pakke lige så tæt som afrundede partikler. Herved vil både skarpe og runde partikler kunne opnå samme størrelse for kornfaktoren.

Betydende parametre

Følgende forhold er fundet betydningsfulde i forbindelse med en eksperimentel bestemmelse af egenpakningen for et tilslagsmateriale:

Pakningsmetode:

Den aktuelt anvendte pakningsmetode har betydning for egenpakningen. Forskellige pakningsmetoder vil således

kunne påvirke tilslagsmaterialer forskelligt. Som nævnt er det fundet, at den største entydighed ved bestemmelse af pakningsgraden opnås ved at forsøge at påvirke tilslagsmaterialet til en maksimal pakning.

Ved påfyldning af et tilslagsmateriale i en målebeholder skal det sikres, at materialet påfyldes homogent. Tilslagsmaterialer med en relativ stor størrelsesforskel mellem partiklerne, eksempelvis et grusmateriale med partikler mellem 0,1 og 8 mm, kan være vanskelige at pakke homogent. Dette skyldes, at der er forøget risiko for separation af store og små partikler.

Aflæsningsnøjagtighed på volumenbestemmelse:

Den nøjagtighed, hvormed volumenet af et givet materiale kan bestemmes, har stor indflydelse på usikkerheden i bestemmelsen af egenpakning. For en given mængde materiale hænger aflæsningsnøjagtigheden blandt andet sammen med den anvendte målebeholders tværsnitsareal og mindste måleenhed. Med hensyn til aflæsningsnøjagtigheden er det vigtigt at kunne definere en plan overflade af det pakkede tilslagsmateriale. Som nævnt tidligere kan det derfor anbefales at benytte en målebeholder med en diameter på mindst 10 gange

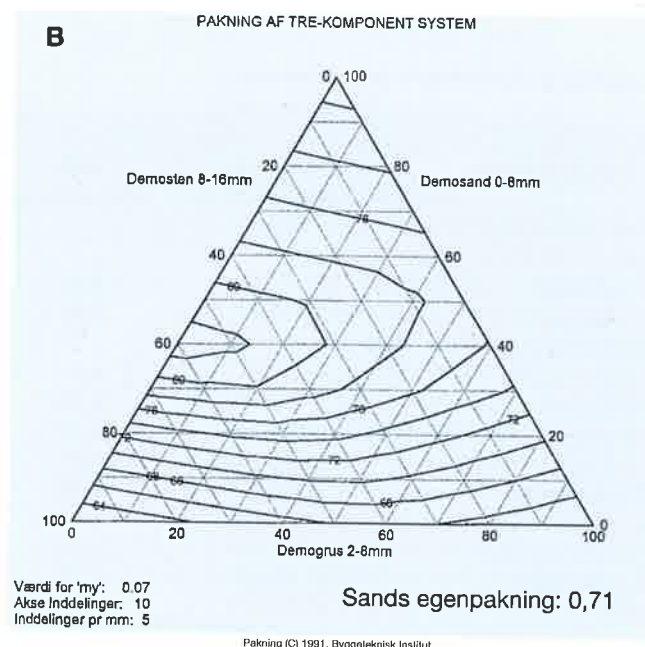
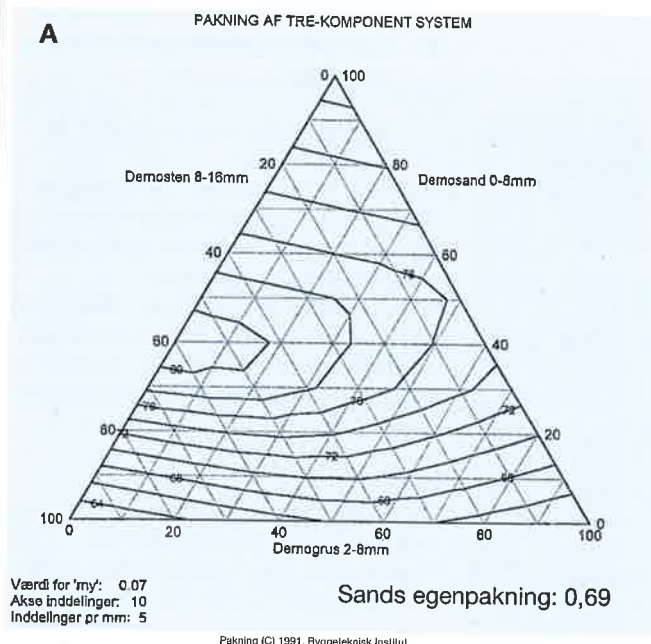
største partikeldiameter. Jo større beholder der anvendes, desto mere sikker bliver bestemmelsen af egenpakningen.

Usikkerhedsbetragtning

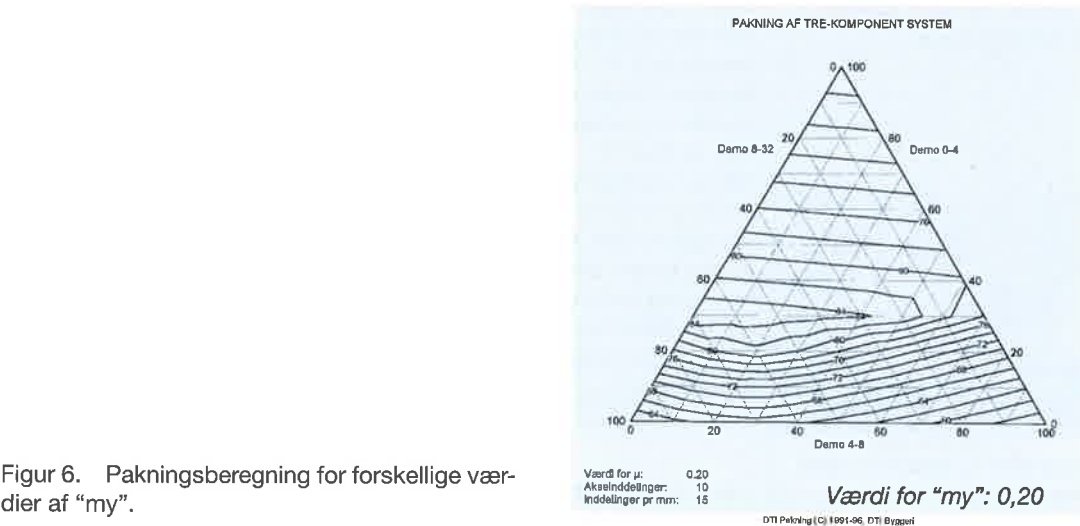
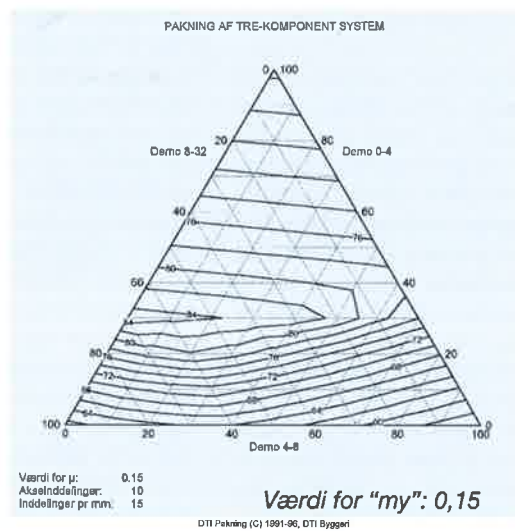
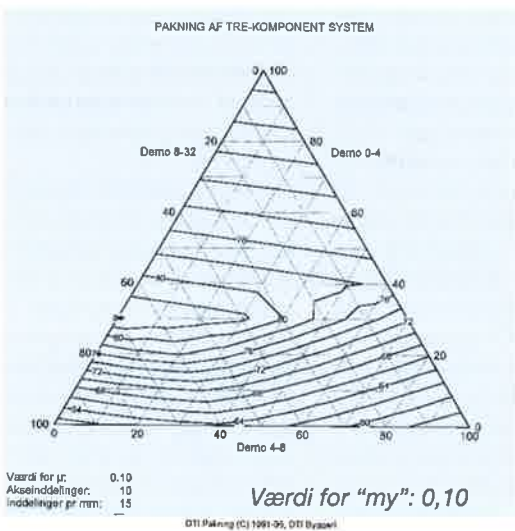
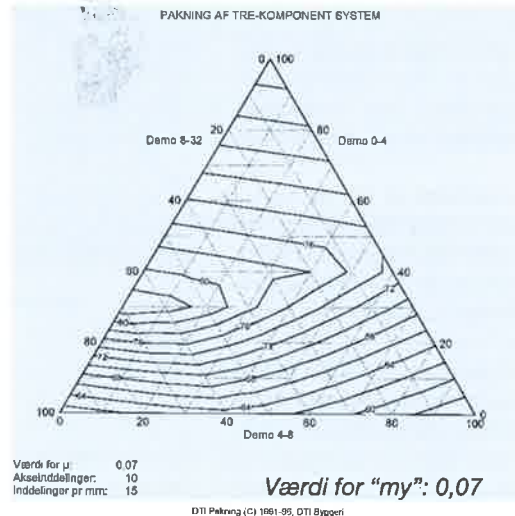
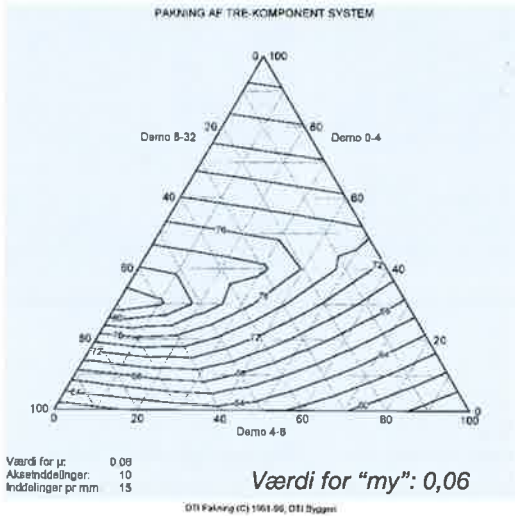
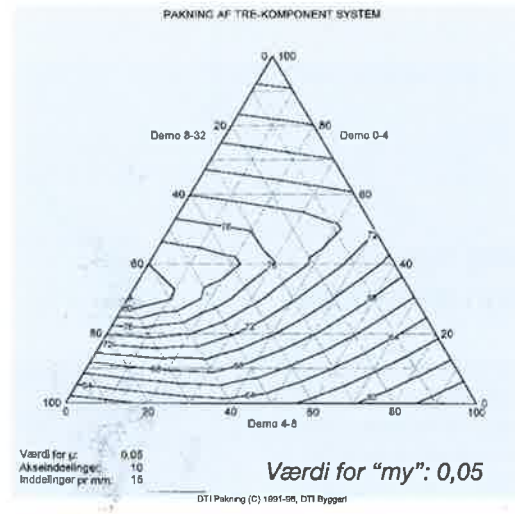
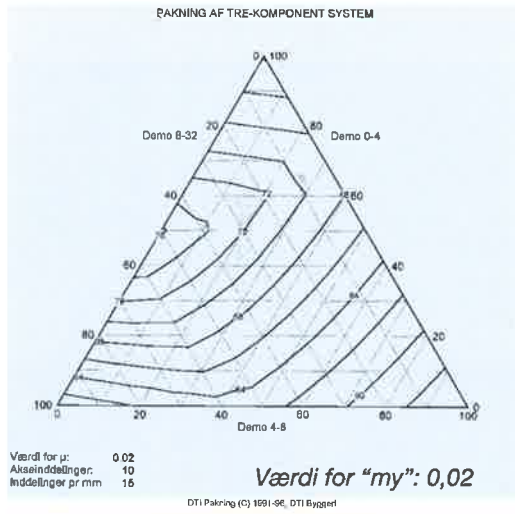
Reproducerbarheden af metoden er god ved omhyggelig udførelse. Reproducerbarheden er mindre god, da metoden kan være personafhængig. Det anbefales derfor, at det er den samme person, der udfører egenpakningsbestemmelserne.

Der kan forventes en usikkerhed på den eksperimentelt bestemte egenpakning på omkring $\pm 0,01$ ved målinger på sand- og stenmaterialer. For en middelværdi på 0,60 vil usikkerhedsintervallet for egenpakning således typisk ligge fra 0,59 til 0,61.

Figur 5 viser, hvor stor betydning usikkerheden på bestemmelse af egenpakningen har på udseendet af pakningsdiagrammet for tre materialer. Egenpakningen for materialet Demosand varierer her mellem 0,69 og 0,71. Det kan ses, at placeringen af området med maksimal beregnet pakning og det overordnede billede af niveaukurverne ikke ændrer sig, mens den maksimale pakning ændrer sig fra 80 til 82 %, når pasta-mængden optimeres efter pakningen af tilslaget.



Figur 5. Betydningen af usikkerhed på bestemmelse af egenpakning.



Figur 6. Pakningsberegning for forskellige værdier af "my".

Kalibrering og verifikation af model

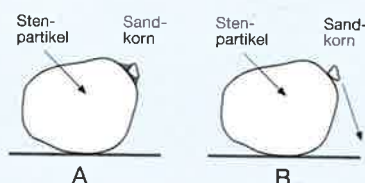
Dette afsnit omhandler kalibrering og verifikation af en beregningsmodel, der danner grundlag for et kommercielt tilgængeligt pakningsprogram [12].

“my”-værdi

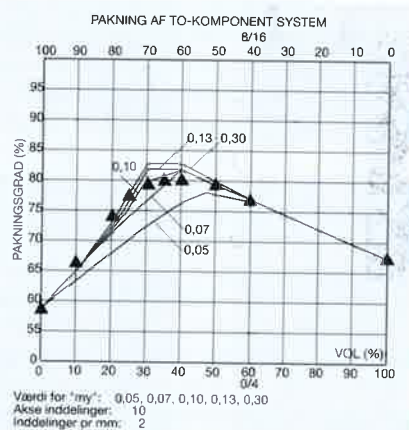
“my”-værdien er en slags interaktionsfaktor. Betydningen af “my”-værdien blev forklaret i forrige afsnit. “my”-værdien er fundet at være lig 0,20 for kugleformede partikler [9].

viser resultatet af en pakningsberegning med tre materialer for forskellige værdier af “my” i intervallet 0,02-0,20. Det kan ses, at der er stor forskel i niveaukurvernes figur fra lille til stor “my”-værdi. For “my”-værdier i området 0,07 til 0,13, som er det, der anvendes mest i praksis (se senere i afsnittet) vil pakningsanalysen være forholdsvis ufølsom. Denne iagttagelse skal også ses på baggrund af anvendelsen af pakningsprogrammet til udpegnings af områder – ikke punkter – med maksimal pakning, se næste afsnit.

For at fastlægge “my”-værdien ud fra praktiske forsøg, er det nødvendigt at benytte vådpakning. Dette skyldes, at sand og sten ved en tørpakning separerer. Problemet er størst ved små sandprocenter, hvor sandet ikke kan udfylde hulrummet mellem stenene. Der sker det, at sandpartiklerne ved en tørpakning ikke vil forblive i en bestemt position i forhold til stenpartiklerne, men “falder ned” af stenen, se fig. 7 B. Figur 7 A viser det samme ved vådpakning, her fastholdes sandpartiklen af en væskemenisken. Ovennævnte betyder, at især tørpakningsmålinger af kombinationer med sandprocenter, der er mindre end, hvad der er nødvendigt for at udfylde hulrummet mellem stenene, bliver fejlbehæftede.



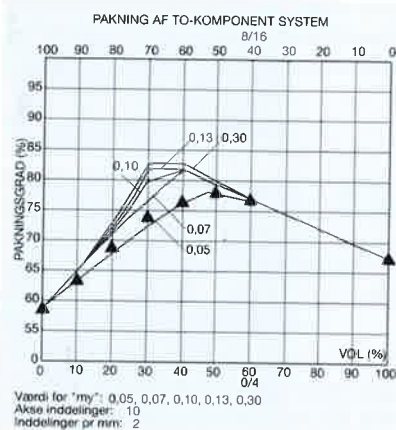
Figur 7. Stenpartikel og sandkorn med og uden væskemenisken.



Figur 8. Vådpakningsmåling med ICT-apparatet.

Bestemmelsen af “my”-værdien ved vådpakning er på Aalborg Portland's Cement- og Betonlaboratoriet (CBL) udført ved hjælp af ICT-apparatet – omtalt i [18]. Med ICT-apparatet er det muligt at påføre en grusprøve et tryk, der tilnærmelsesvis modsvarer den rumfangsudvidelse, som en vandtilsætningen medfører. Trykket på ICT-apparatet blev indstillet og vandprocenten tilpasset således, at egenpakningen (når der måles på et usammensat materiale – sand 0-4 mm eller sten 4-8 mm eller 8-16 mm) målt ved tørpakning og egenpakningen målt ved vådpakning med ICT-apparatet var ens. Efterfølgende blev forskellige pakningskombinationer målt og resultaterne indtegnet i figur 8 som viser tokomponente pakningsberegninger udført med forskellige “my”-værdier. “My”-værdien for den kurve eller pakningskombination, der ligger nærmest, hvad der er målt med ICT-apparatet er valgt som repræsentativ for den anvendte gruskombination. Til sammenligning er der vist en tørpakningsmåling med samme materialer, se figur 9.

Ud fra ovennævnte er “my”-værdien bestemt til 0,10 for granitskærver og 0,13 for søsten. Ved kombinationer af skærver og søsten eller andre materialer kan “my”-værdien ekstra- eller interpoleres ud fra disse værdier. Ved alle praktiske arbejder vil ovennævnte værdier kunne anvendes.



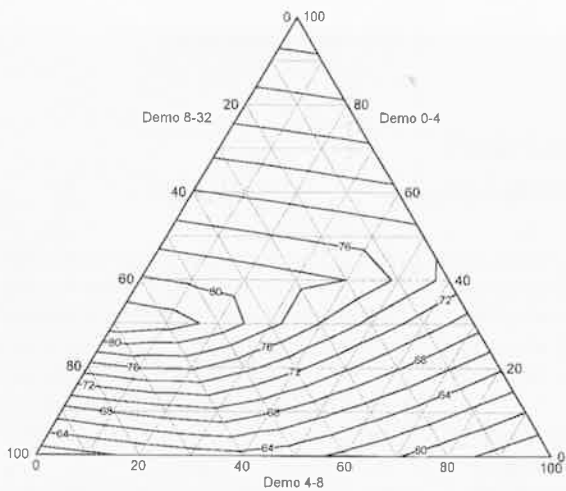
Figur 9. Tørpakningsmåling.

Nøjagtighed af beregninger

Det er ikke muligt – og har ikke nogen mening – at definere et entydigt optimum ved hjælp af pakningsberegninger. Dette vil blive diskuteret mere indgående i det efterfølgende afsnit. Alligevel skal der knyttes enkelte kommentarer til usikkerheden/nøjagtigheden ved pakningsberegninger.

Der er i det benyttede program mulighed for at vælge antallet af inddelinger af kornkurven samt antallet af pakningskombinationer, der skal beregnes. Disse parametre har naturligvis indflydelse på nøjagtigheden af beregningsresultatet. Figur 10 viser resultatet af en pakningsberegning med tre materialer for forskellige værdier af antal inddelinger pr. mm, som angiver antallet af inddelinger af kornkurven. Jo flere inddelinger af kornkurven, desto mere nøjagtig er beregningen – og desto længere er beregningstiden. Det kan ses af figur 10, at pakningsdiagrammet ikke ændres væsentligt, når antal inddelinger pr. mm er større end 3. Figur 11 viser resultatet af en pakningsberegning med tre materialer for forskellige værdier af akseinddelinger, som er proportional med antallet af beregnede pakningskombinationer. Det kan ses af figur 11, at niveaukurverne er mere hakede, jo mindre værdien for akseinddelinger er. Derudover er der ikke væsentlig forskel på pakningsdiagrammet afhængigt af antallet af akseinddelinger. Derudover må der gøres opmærksom på, at følgende parametre har betydning for pakningsberegningerne:

PAKNING AF TRE-KOMPONENT SYSTEM

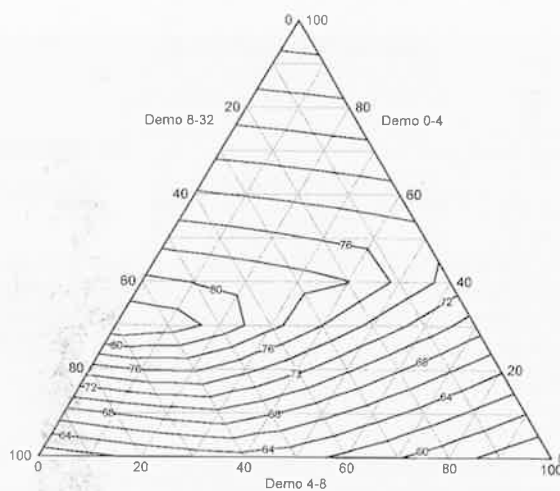


Værdi for μ : 0.07
 Akseinddelinger: 10
 Inddelinger pr mm: 15

Inddeling pr. mm: 15

DTI Pakning (C) 1991-96, DTI Byggeri

PAKNING AF TRE-KOMPONENT SYSTEM

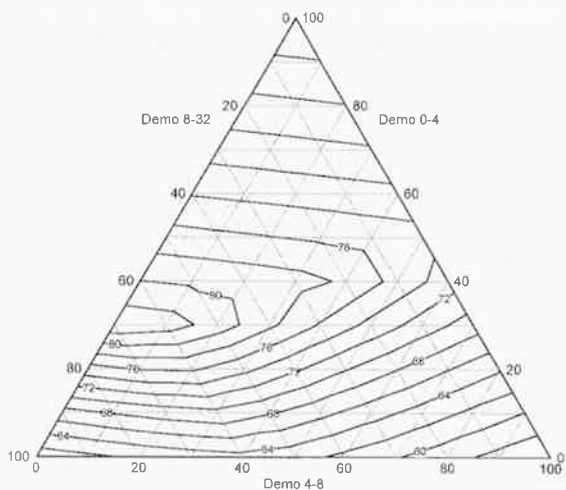


Værdi for μ : 0.07
 Akseinddelinger: 10
 Inddelinger pr mm: 10

Inddeling pr. mm: 10

DTI Pakning (C) 1991-96, DTI Byggeri

PAKNING AF TRE-KOMPONENT SYSTEM

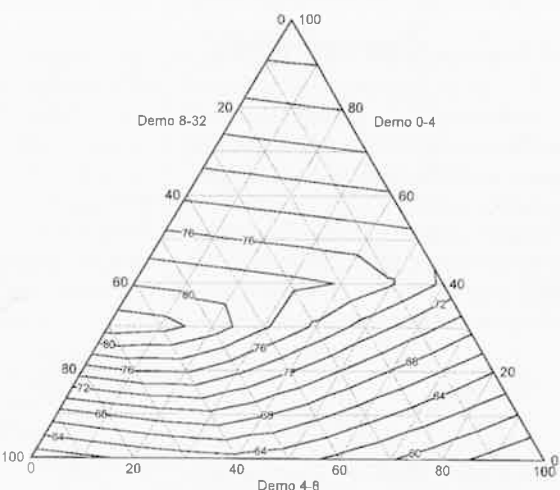


Værdi for μ : 0.07
 Akseinddelinger: 10
 Inddelinger pr mm: 7

Inddeling pr. mm: 7

DTI Pakning (C) 1991-96, DTI Byggeri

PAKNING AF TRE-KOMPONENT SYSTEM

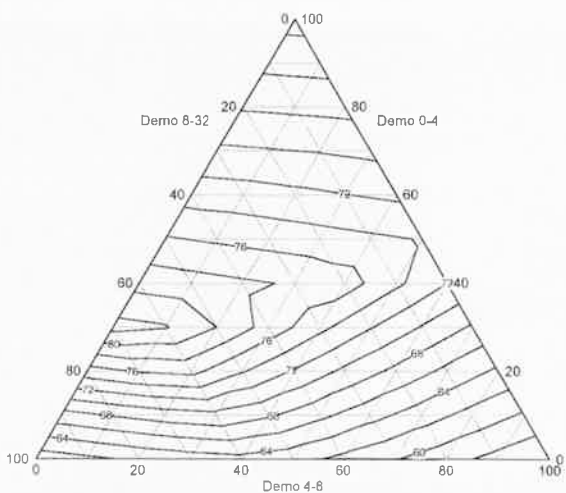


Værdi for μ : 0.07
 Akseinddelinger: 10
 Inddelinger pr mm: 5

Inddeling pr. mm: 5

DTI Pakning (C) 1991-96, DTI Byggeri

PAKNING AF TRE-KOMPONENT SYSTEM

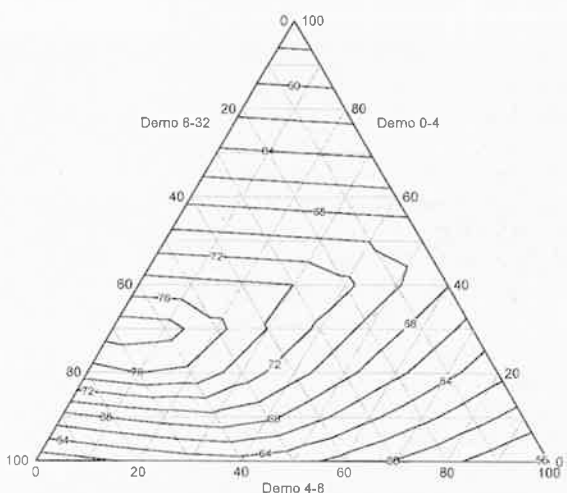


Værdi for μ : 0.07
 Akseinddelinger: 10
 Inddelinger pr mm: 3

Inddeling pr. mm: 3

DTI Pakning (C) 1991-96, DTI Byggeri

PAKNING AF TRE-KOMPONENT SYSTEM



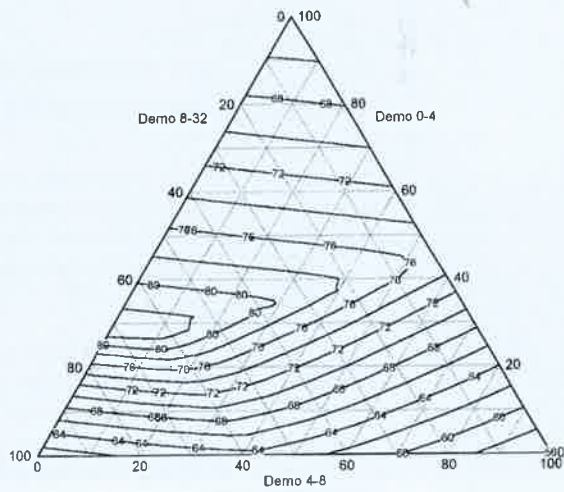
Værdi for μ : 0.07
 Akseinddelinger: 10
 Inddelinger pr mm: 1

Inddeling pr. mm: 1

DTI Pakning (C) 1991-96, DTI Byggeri

Figur 10. Pakningsberegninger for forskellige værdier af antal inddelinger pr. mm.

PAKNING AF TRE-KOMPONENT SYSTEM

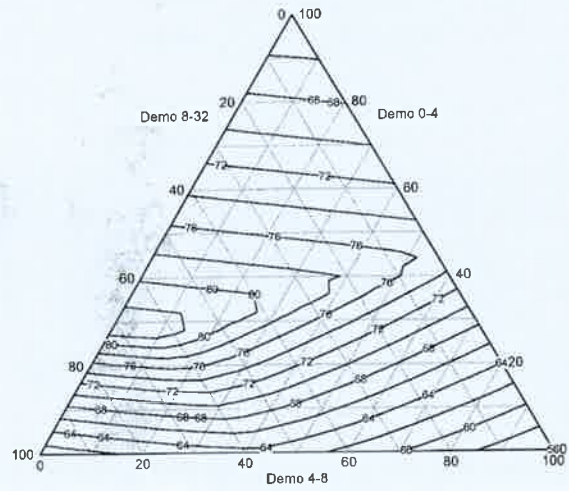


Værdi for μ : 0.07
 Akseinddelinger: 35
 Inddelinger pr mm: 5

Akseinddelinger: 35

DTI Pakning (C) 1991-96, DTI Byggeri

PAKNING AF TRE-KOMPONENT SYSTEM

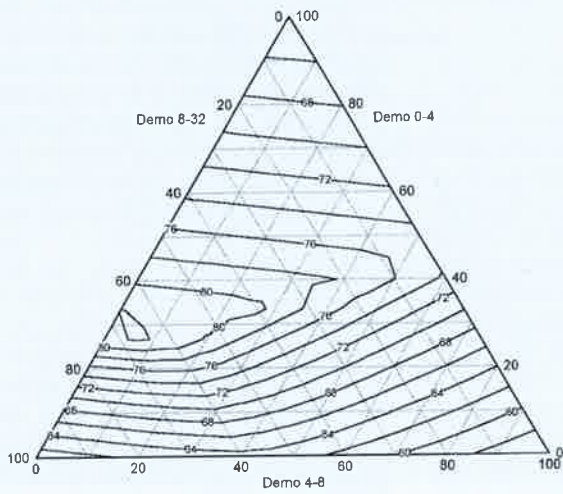


Værdi for μ : 0.07
 Akseinddelinger: 25
 Inddelinger pr mm: 5

Akseinddelinger: 25

DTI Pakning (C) 1991-96, DTI Byggeri

PAKNING AF TRE-KOMPONENT

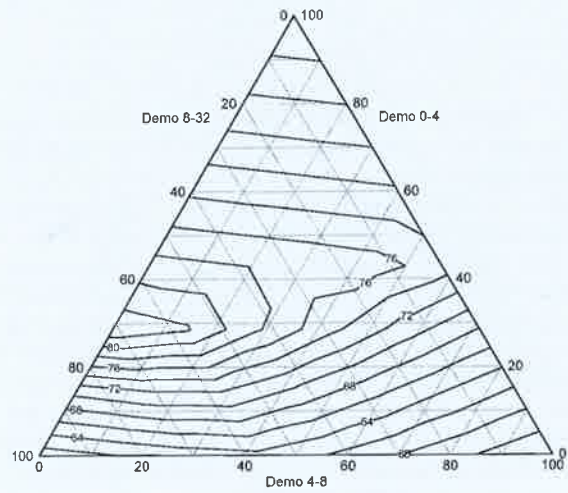


Værdi for μ : 0.07
 Akseinddelinger: 15
 Inddelinger pr mm: 5

Akseinddelinger: 15

DTI Pakning (C) 1991-96, DTI Byggeri

PAKNING AF TRE-KOMPONENT SYSTEM

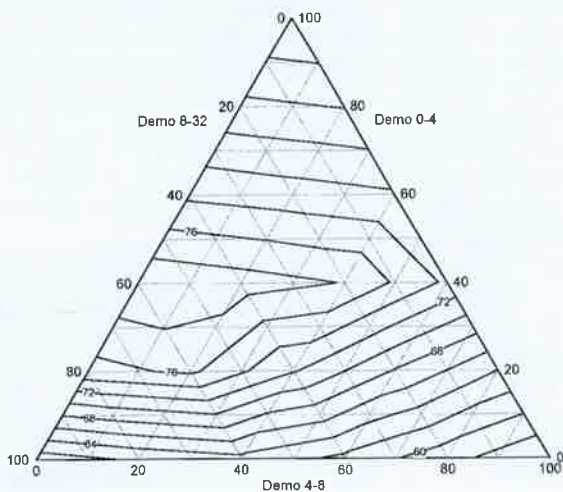


Værdi for μ : 0.07
 Akseinddelinger: 7
 Inddelinger pr mm: 5

Akseinddelinger: 7

DTI Pakning (C) 1991-96, DTI Byggeri

PAKNING AF TRE-KOMPONENT SYSTEM



Værdi for μ : 0.07
 Akseinddelinger: 5
 Inddelinger pr mm: 5

Akseinddelinger: 5

DTI Pakning (C) 1991-96, DTI Byggeri

Figur 11. Pakningsberegninger for forskellige værdier af akseinddelinger.

Praktisk anvendelse af pakningsberegninger

- Metoden til at bestemme egenpakningen, omtalt i forrige afsnit.
- Nøjagtigheden ved bestemmelse af egenpakningen, omtalt i forrige afsnit.
- Fastlæggelse af "my"-værdi.
- Usikkerhed ved bestemmelse af kornkurve.

Endelig skal det erindres, at pakningsberegninger af tilslagsmaterialer udføres på betonmaterialer før blanding, og at sammenhængen mellem pakningsberegninger og betonens egenskaber ikke er entydig. Næste afsnit omtaler bl.a. koblingen mellem de teoretiske pakningsberegninger og sammensætning af betonen.

Verifikation af model

viser resultatet af en pakningsberegning for tre forskellige materialer. Derudover er vist eksperimentelle bestemmelser af pakningen for udvalgte materialekombinationer. Det kan ses, at der er rimelig god overensstemmelse mellem teoretisk og eksperimentelt bestemte værdier for pakningen. Selv om der er få eksperimentelle bestemmelser, antyder figuren dog, at modellen beskriver virkeligheden tilfredsstillende.

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 pastaandhold
- 3) design af porestruktur i beton.

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 pastaandhold 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 4.

Selvfølgelig er der også andre hensyn at tage som krav til max. stenstørrelse, krav om en bestemt miljøklasse, tilslag m.m. Praktiske erfaringer med pakningsberegninger af tilslaget i velfungerende betoner, der er sammensat på baggrund af

erfarings- og tommelfingerregler viser, at den anvendte tilslagskombination er i overensstemmelse med optimum i pakningsdiagrammet eller lidt udenfor optimum i retning af en mere sandrig beton.

Ad 2)

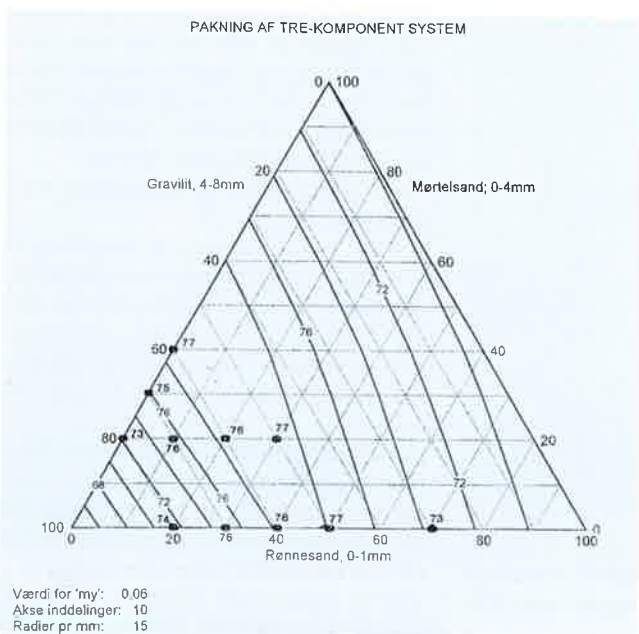
Når tilslaget er valgt – og dermed en bestemt pakning – kan mængden af pasta vælges således, at den passer til hulrummet imellem tilslaget. Der skal dog typisk anvendes ca. ~ 1-4% mere pasta, hvilket kan forklares med, at hver tilslagspartikel overtrækkes med et tyndt lag pasta og således ikke ligger i kontakt som forudsat ved pakningsberegningen. Derudover skal der tages hensyn til luft således, at mængden af pasta i vol. % til nærmelsesvis kan beregnes som: 100 – pakning – luft + (1-4). Denne håndregel gælder den teoretiske pastamængde. I praksis – og for almindeligt tilgængelige udførelsesmetoder – skal pastamængden være højere alt afhængig af vand/cementforhold, sætmål m.m. Dette er beskrevet nærmere i afsnittet om betonproportionering.

Ad 3)

Det er muligt at designe mængden af luft i beton alene ud fra en optimering af tilslagssammensætningen og pastamængden – uden brug af et kemisk virkende luftindblandingsmiddel [14].

Det totale luftindhold er afhængigt af størrelsen af pastaunderskuddet set i forhold til, hvad der er plads til i hulrummene mellem tilslaget beregnet vha. pakning. En sådan typisk dannet luftporestruktur mellem tilslaget er desuden mere stabil over for vibration, pumpning og transport end kemisk dannet luft i cementpastaen.

Der kan dog være vanskeligheder med at styre design af luftporestruktur på ovenfor beskrevne måde i praktisk betonproduktion. Det skyldes, at der med de nuværende produktionsfaciliteter ikke er tilstrækkelig styr på kornkurver og til at kunne styre pakningen nøjagtigt. Derudover kan det være vanskeligt at udstøbe betoner med fysisk dannet luftporestruktur med konventionelle udførelsesmetoder for frisk beton. Designmetoden er umiddelbart anvendelig til tørre betoner. Det er dog muligt, at designmetoden vil kunne anvendes til frisk beton også ved brug af de nye højeffektive superplastificeringsstoffer, der er kommet på markedet.



Figur 12. Sammenligning mellem teoretiske og eksperimentelle pakningsbestemmelser.

Eksempler

Pastatillæg for aktuelle betontyper

I tabel 3 er recepter til henholdsvis fabriksbeton, beton til pæle og trapper, beton til afløbsprodukter, beton til belægningsprodukter, terrazzobeton og vejbeton analyseret. I alle recepterne er der taget udgangspunkt i den aktuelt anvendte tilslagskombination. For denne

kombination er det aktuelle indhold af tilslag sammenlignet med det beregningsmæssige maksimale tilslagsindhold. Pastatillægget (inkl. luft) i tabel 3 er beregnet som:

$$\text{Pastatillæg} = V_2 - V_1 \text{ (vol. \%)} \quad (4)$$

hvor V_1 (vol. %) er det aktuelle indhold af

tilslag i recepten, og V_2 (vol. %) er den beregnede pakning af den aktuelle tilslagskombination. Se afsnittet om pastaoverskud og pastatillæg under "Praktisk vejledning i betonproportionering ud fra pakningsberegninger", side 17.

Som det ses af tabel 3 ligger det beregnede pastatillæg på 6-10 vol. % for fabriksbetoner og på -2 til +5 vol. % for de andre recepttyper. Det store pastatillæg i fabriksbetoner skyldes, at disse betoner skal være så flydende, at de skal kunne pumpes. Der er dog sandsynligvis en mulighed for at reducere pastaindholdet i mange fabriksbetoner.

Det kan også ses af tabellen, at pastatillægget er større i fabriksbetoner med iblandet luft end i fabriksbeton uden iblandet luft.

Det er endvidere karakteristisk, at tilslaget i fabriksbetonerne pakker bedre end tilslaget i de øvrige betoner. Dette skyldes blandt andet, at fabriksbeton indeholder tilslag med større maksimal diameter i forhold til, hvad der gælder for beton til betonvarer.

Udvælgelse af tilslagsmaterialer

En dansk elementfabrik har med succes benyttet pakningskonceptet til undersøgelse af forskellige tilslagsmaterialer, som kvalitetsmæssigt og prismæssigt kunne være attraktive til anvendelse i produktionen. Følgende eksempel med tilslag i passiv miljøklasse stammer fra denne undersøgelse.

Densitet, absorption, indhold af reaktive korn, indhold af kalk, indhold af ler, afvigelser af kornkurve samt egenpakning er bestemt for de undersøgte tilslagsmaterialer. Derudover er pakningen beregnet for det samlede tilslagsmateriale.

Resultatet af disse undersøgelser ses i tabel 4.

Det kan ses af tabellen, at mineralogisk er tilslag nr. 1 det bedste, men pakningsmæssigt er tilslag nr. 2 at foretrække. Den teoretiske pakning af samtlige tilslagsmaterialer er, som det kan ses af tabel 4, beregnet til 0,76 med tilslag nr. 1 og 0,80 med tilslag nr. 2.

Der er gennemført en prøveproduktion med huldækelementer for beton tilsat henholdsvis tilslag nr. 1 og 2. Resultatet af undersøgelserne er, at vandbehovet er ca. 5% mindre for beton med tilslag nr. 2 end for beton med tilslag nr. 1, hvilket sandsynligvis skyldes den bedre pakning

Recept nr.	Styrkeklasse	Aktuelt indhold tilslag V_1 (vol. %)	Beregnet pakning af tilslaget V_2 (vol. %)	Beregnet pastatillæg $V_2 - V_1$ (vol. %)
Fabriksbeton uden luft				
F4	25	72	82	10
F5	15	71	81	10
F6	20	72	82	10
F7	25	76	84	8
F8	30	76	82	6
F9	15	76	82	6
F10	20	75	82	7
F11	25	73	82	9
F12	30	77	84	7
Fabriksbeton med luft				
F1	35	77	84	7
F2	35	76	84	8
F3	35	74	84	10
Beton til pæle og trapper				
802	30	70	73	3
803	30	73	76	3
832	40	74	76	2
835	40	74	76	2
Terrazzobeton				
816	40	62	60	-2
817	40	61	60	-1
818	40	62	60	-2
819	40	60	61	1
Beton til afløb				
72	40	74	78	4
102	40	73	76	3
Beton til belægninger				
B1	40	71	73	2
Vejbeton				
V1		78	83	5
V2		72	76	4
V3		79	84	5

Tabel 3. Sammenligning mellem aktuelt indhold af tilslag og beregnet maksimalt indhold af tilslag ved givne tilslagskombinationer. Pastatillæg er beregnet som vist i formel (4).

af betonen med tilslag nr. 2.

Prøveproduktionen viste desuden, at der med brug af tilslag nr. 2 var en tendens til lidt færre lufthuller på elementernes underside.

Det kan sammenfattende konkluderes ud fra undersøgelserne, at betonen med tilslaget med den bedste pakning, dvs. tilslag nr. 2, opnår de bedste egenskaber.

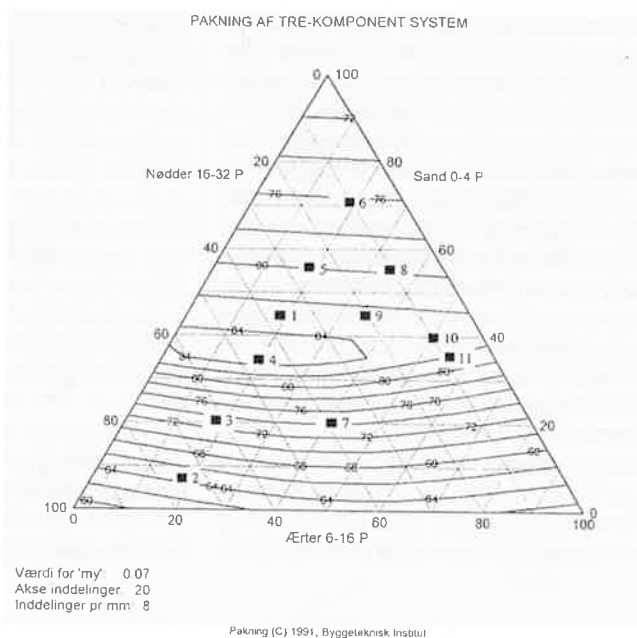
Der er ingen tegn på, at elementernes kvalitet bliver dårligere med tilslag nr. 2 i forhold til tilslag nr. 1.

Prismæssigt er der forskel på de to undersøgte tilslagstyper, sådan at der kan opnås en besparelse ved brug af tilslag nr. 2 i forhold til tilslag nr. 1.

Sammenhæng mellem pakning af tilslagsmaterialer og frisk betons egenskaber

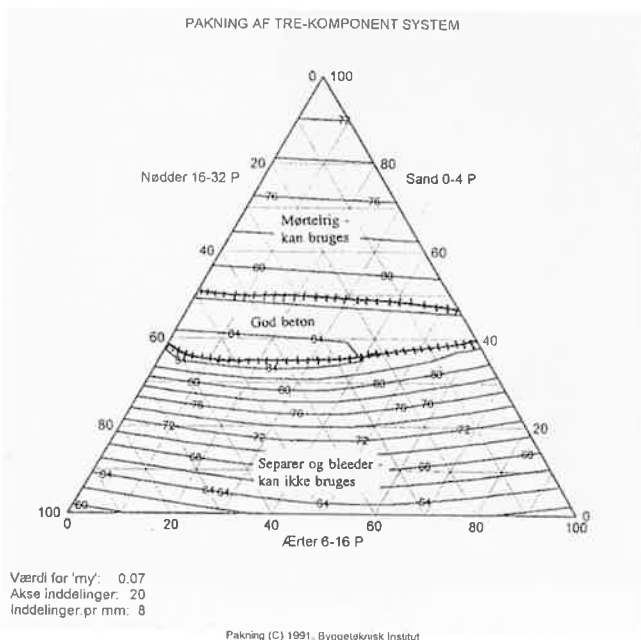
Følgende er en summering af forsøg udført i laboratoriet med fabriksblandet beton med henblik på at fastlægge sammenhængen mellem frisk betons egenskaber og pakningen af tilslagsmaterialerne [15].

	Tilslag nr. 1 0/4	Tilslag nr. 2 0/4
Egenpakning	0,65	0,71
Densitet, kg/m ³	2632	2560
Absorption, %	0,8	1,2
Reaktive korn, %	ca. 1,2	ca. 2,1
Kalk, %	7,0	10,5
Ler, %	4,9	5,0
Pakning, samlet tilslag	0,76	0,80



Tabel 4. Resultatet af undersøgelse af forskellige tilslagstyper.

Fig. 13 Afprøvede tilslagkombinationer, 1-11, mærket med ■.



Figur 14. Visuel vurdering af frisk beton.

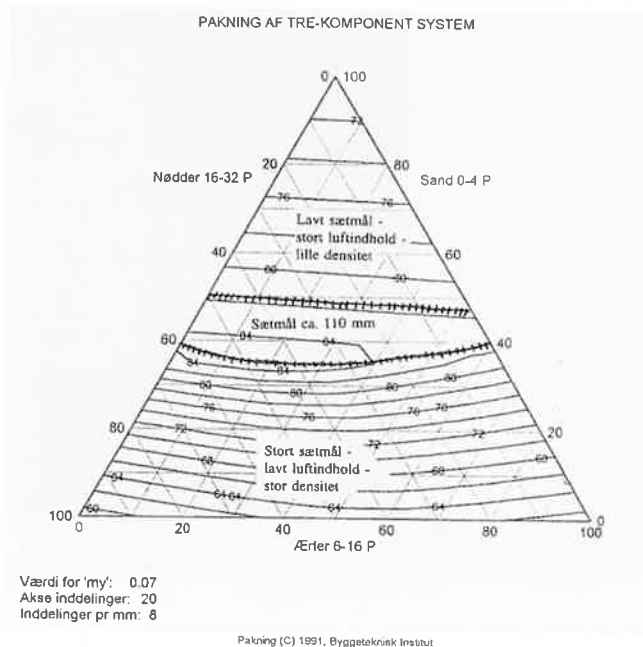


Fig. 15. Frisk beton egenskaber

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

Figur 13 viser de tilslagskombinationer, der er anvendt i de udførte blandinger.

Figur 14 og 15 viser områderne i pakningsprogrammet, der resulterer i forskellige egenskaber af den friske beton.

Det kan ses af figur 14 og 15, at de tilslagskombinationer, der resulterer i en god og udstøbelig beton ligger i og lidt over (øget indhold af sand) det område hvor der er optimum for pakningen. Det nederste område i pakningsdiagrammet egner sig ikke til betonfremstilling. 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 tilslagsets pakning og dermed i betonernes egenskaber.

Det er knapt så farligt at bevæge sig ind i det mere mørtelige område, hvor betonerne har et relativt stort luftindhold og et lille sætmål. Betonerne er bearbejdeli-

ge 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. Med sandoverskud bliver pastaunderskuddet finfordelt, mens det bliver grovfordelt med stenoverskud.

Figur 16 viser et foto af en cylinder fra prøveblanding 2, 3, 1 og 6. Billedet illustrerer med al tydelighed, hvordan tilslagskombinationen influerer på betonen. Især fremgår det, at beton med en meget stenrig tilslagssammensætning, der pakker dårligt, er ubrugelig.

Den her udførte undersøgelse bekræfter, at der er en sammenhæng mellem pakningen af tilslagsmaterialerne og den friske betons egenskaber. Resultaterne er ikke overraskende erfaringsmæssigt, men illustrerer pakningsprogrammets anvendelighed til at skabe et overblik over mulige kombinationer.

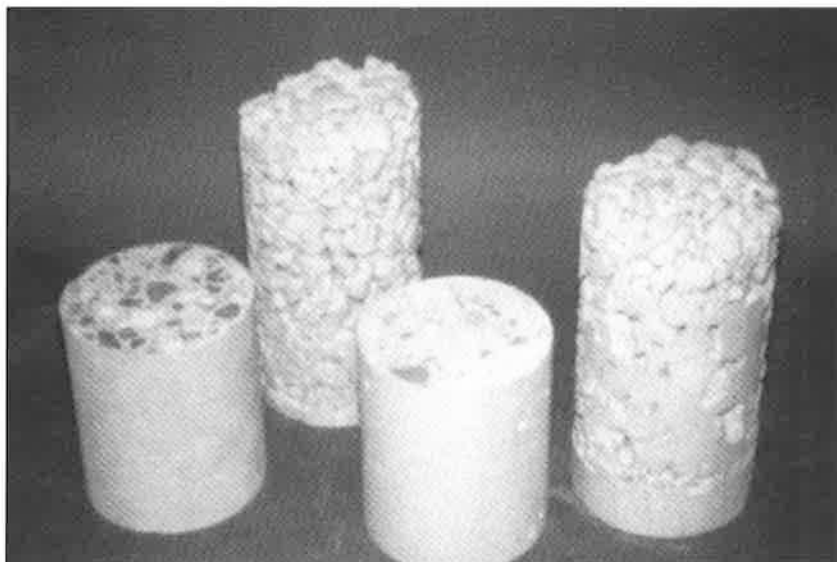
Optimering af pastaindhold

En dansk producent har med succes benyttet pakningskonceptet ved en sy-

stematisk 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 tabel 5.

Optimering af nye tilslagsmaterialer

En dansk producent, af blandt andet fabriksbeton benytter blandt andet 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 materi-



Figur 16. Foto af en cylinder fra prøveblanding 2, 3, 1 og 6.

Indhold	Recept 807 (før) indhold pr. m ³	Recept 807 (efter) indhold pr. m ³
Cement, liter	123	113
Vand, liter	142	128
Luft + additiver, liter	66	71
Pastaindhold, liter	331	312
Tilslag, liter	669	688
Pastatillæg	12,0%	9,0%

Tabel 5. Eksempel på optimering af beton ved hjælp af pakningskoncept – minimering af pastatillæg.

ale fraktioner: 0-4mm, 4-8mm, 8-16mm og 16-32mm, 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.

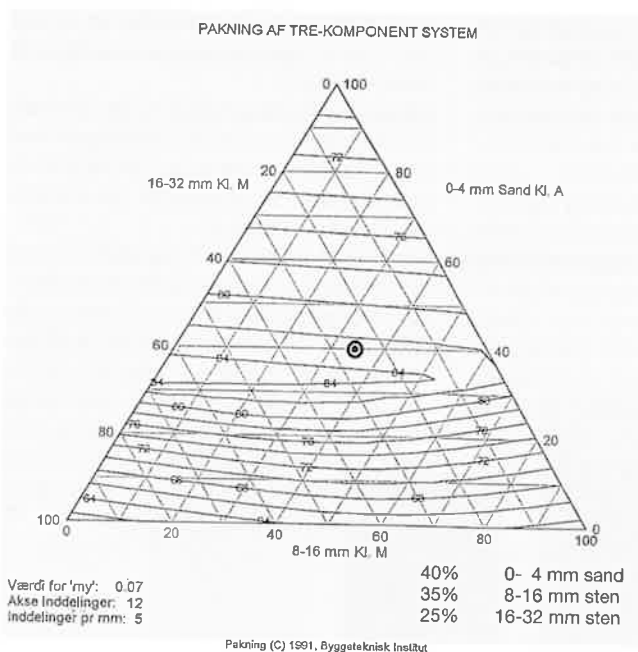
Sammensætning og optimering af vejbeton

Aalborg Portland's Cement- og Betonlaboratoriet (CBL) har i forbindelse med udvælgelse af egnede tilslagsmaterialer til de såkaldte vejbetoner fået udført en del pakningsberegninger hos en dansk betonproducent. Ved et forsøg med at udlægge en vejbeton baseret på sømaterialer blev der foretaget en pakningsberegning som grundlag for en prøvestøbning. Pakningsberegningen, se figur

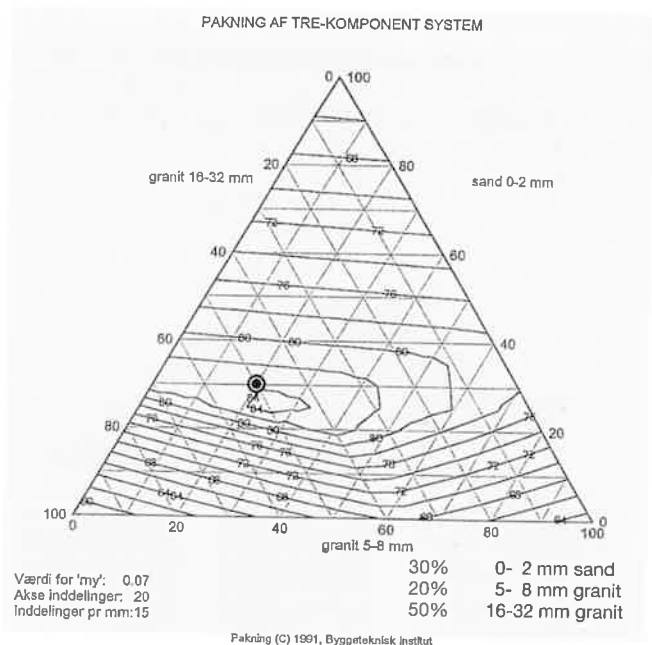
17, gav et overblik over de tilslagskombinationer der umiddelbart kunne virke gunstige. På baggrund af pakningsberegningen blev der udvalgt en tilslagskombination til brug ved forsøget. Den udvalgte kombination er indtegnet på figuren.

Ved et andet forsøg med at udlægge en vejbeton baseret på knuste klippematerialer blev der først udført eksperimentelle pakningsforsøg i laboratoriet med tre materialefraktioner (0-2 mm, 5-8 mm og 16-32 mm). På baggrund af de eksperimentelle laboratorieforsøg blev det fundet, at den tætteste pakning kunne opnås ved en kombination af 30 vol.% 0-2 mm, 20 vol.% 5-8 mm og 50 vol.% 16-32 mm materiale.

Denne kombination blev derefter benyttet ved et mindre udlægningsforsøg, hvor der var problemer med overfladens udseende – sandsynligvis på grund af et lille indhold af sand. På baggrund af pakningsberegninger blev den eksperimentelt fundne optimale pakning eftervist, se figur 18. Pakningsberegningerne kunne derefter udnyttes ved en ny kombination af tilslagsmaterialer under hensyntagen til kravet om høj pakningsgrad og øget indhold af sand.



Figur 17. Pakningsberegninger som grundlag for udvælgelse af sømaterialer til en vejbeton. Den udvalgte kombination er indtegnet på diagrammet.



Figur 18. Pakningsberegning til vejbeton. Det afmærkede punkt er eksperimentelt fundet at give den maksimale pakningsgrad.

Praktisk vejledning i betonproportionering ud fra pakningsberegninger

Indledning

I dette afsnit gennemgås, hvordan en betonproportionering kan foretages i praksis ud fra en pakningsberegning. Dette afsnit uddyber de overordnede principper skitseret i afsnittet "Praktisk anvendelse af pakningsberegninger", side 11.

Med fastlagt v/c-forhold og bearbejdelsevises, hvordan det ud fra en pakningsberegning og et empirisk bestemt pastatillæg, er muligt at udføre en proportionering, der som noget nyt tager hensyn til aktuelle hulrum i tilslaget.

Ved at tage hensyn til det aktuelle hulrum i tilslaget kan der udføres en mere nøjagtig proportionering.

Tilslagssammensætning

Der gennemføres pakningsberegninger med tilgængelige og jf. tekniske specifikationer (f.eks. miljøklasse, max. stenstørrelse) tilladte tilslagstyper. Pakningsberegningerne gennemføres med forskellige typer og størrelser af tilslag og med forskelligt antal tilslag i samme beregning. Ud fra pakningsberegningerne vælges dels tilslagstyper og sammensætningen af disse tilslagstyper. Udvælgelseskriterierne er:

- en stor pakning
- et ikke-følsomt område i pakningsdiagrammet
- et område, der erfaringsmæssigt giver maksimalt flyd (kuglelejeeffekt)

Et eksempel på et typisk resultat af en pakningsberegning ses i figur 19. Området med den maksimale pakning er skraveret. Med en stor pakning minimeres mængden af pasta, der skal anvendes til at udfylde hulrummene imellem tilslaget og fungere som pastatillæg, se senere. Det anbefales at vælge en pakning i det øverste område med den maksimale pakning (dvs. der, hvor sandprocenten er størst), fordi afstanden mellem niveaurverne for pakning er størst. Det betyder, at variationer i tilslaget mht. pakning, kornstørrelsesfordeling og densitet ikke resulterer i store variationer i den resulterende pakning – og dermed i betonegenskaberne. Den større sandprocent bevirker også, at den del af sandet, der ikke får plads i stentilslagets hulrum, virker som kugleleje mellem stenene. Her ved øges bearbejdigheden.

I området nedenfor den maksimale pakning (med en lav sandprocent) ligger niveaurverne tæt, og selv små variatio-

ner i tilslaget kan resultere i store variationer i den resulterende pakning. Erfaringerne viser desuden, at tilslagskombinationer i dette område kan resultere i betoner med bleeding og sten-separation, mens tilslagskombinationer i området lidt over den maksimale pakning typisk resulterer i gode betoner mht. bearbejdelse og andre betonegenskaber. I dette område opstår der friktion mellem stenene og bearbejdigheden bliver mindre.

Det kan ses af figur 19, at fraktionen 5-8 mm ikke er nødvendig for at opnå en god pakning. Det bekræfter erfaringen med, at det ofte kan være nyttigt med partikelspring for at opnå en god beton.

Helt præcist hvilken tilslagskombination i det velegnede område, der skal vælges, må bestemmes ved prøvestøbninger. Optimering af sandprocenten kan dog ske ved følgende fremgangsmåde.

Optimering af sandprocenten

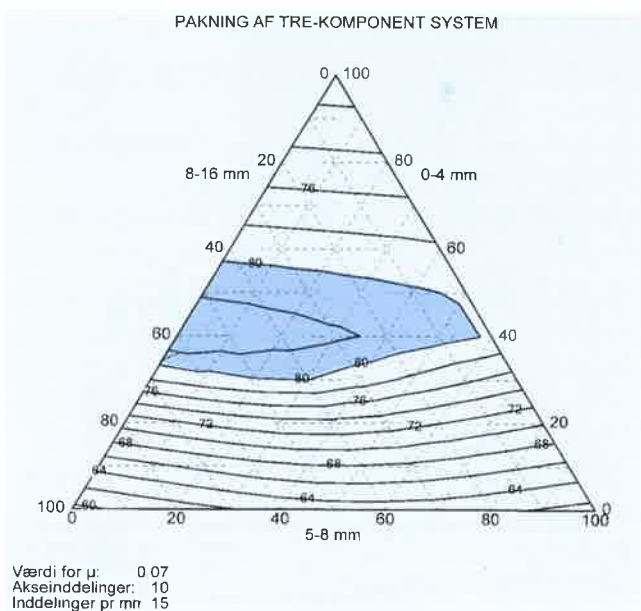
Pakningsberegningen giver et interval for sandprocenten, men den optimale sandprocent for maksimal bearbejdelse kan kun fastlægges ved praktiske forsøg. Dette gøres ved at variere sandprocenten henholdsvis stenprocenten og fastholde alt øvrigt i betonblandingen. Der kan eventuelt optegnes et diagram, se figur 20, hvor sandprocenten sammenholdes med flydeevnen f.eks. målt som omformningstal [17]. Ud fra de fundne punkter kan der ved regression fastlægges en kurve og minimum bestemmes. Sandprocenten ved minimum omformningstal giver den største bearbejdelse.

Pastaoverskud og pastatillæg

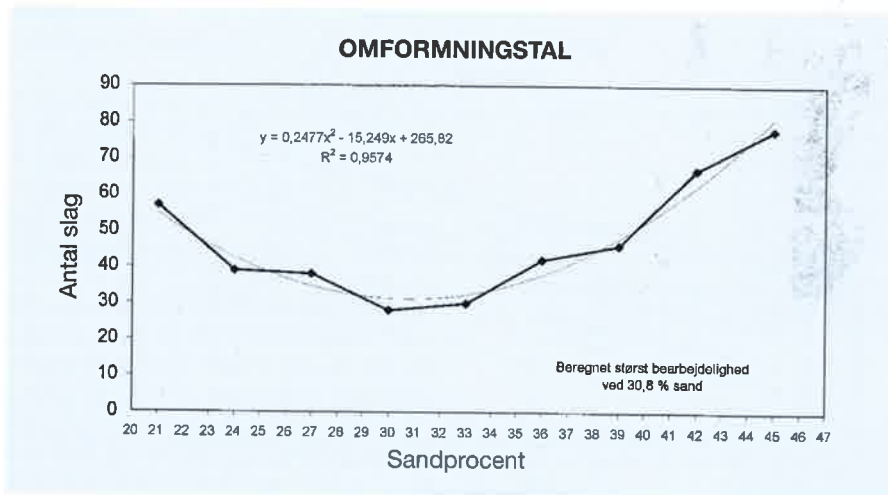
I en rumfangsenhed grus er der et vist rumfang hulrum. Fyldes dette hulrum med pasta evt. kitmasse fås en beton, der hverken har pastaoverskud eller pastaunderskud.

Tilsættes mindre pasta end det, der netop fylder hulrummet i en rumfangsenhed grus, fås pastaunderskud. Tørbetoner og drænbetoner er eksempler på betoner med pastaunderskud.

For at få en traditionel flydende beton må der tilsættes så meget pasta, at der fremkommer et *pastaoverskud*. Dette opnås ved, at der i en rumfangsenhed grus fjernes noget af gruset, og hele det hulrum, der nu er fremkommet i den oprindelige rumfangsenhed, fyldes med pasta. Det kan også udtrykkes på den måde, at man skubber tilslagskornene fra hinanden, således at pakningen forringes.



Figur 19. Eksempel på et typisk resultat af en pakningsberegning.



Figur 20. Omformningstal som funktion af sandprocenten.

$$\text{Pastaoverskud} = (1 - V_1/V_2) \cdot 100 \text{ (vol.\%)}$$

V_1 = Aktual indhold af tilslag i den færdige blanding – (vol.%)

V_2 = Tilslagets beregnede pakning – (vol.%)

Af praktiske årsager indføres herudover begrebet *pastatillæg*, som:

$$\text{Pastatillæg} = V_2 - V_1 \text{ (vol.\%)}$$

Hvis betonen er luftblandet bruges også betegnelsen *kitmassetillæg*.

Grunden til, at det er praktisk at arbejde

med et pastatillæg, er, at dets størrelse alene afhænger af, hvad bearbejdelighed, og v/c-forhold der ønskes; men er uafhængigt af hvilket niveau pakningen har. Når der tilsættes mere pasta ud over hulrummet i gruset, fjernes de enkelte gruspartikler fra hinanden, og pastaen virker som smøremiddel mellem gruspartiklerne og giver derved øget bearbejdelighed. Der kan baseret på forsøgsserier derfor opstilles empiriske tabeller, hvor pastatillægget kan bestemmes, når v/c-forholdet og bearbejdelighed kendes.

Pastatillægget må ikke forveksles med *pastaoverskuddet*, da pastaoverskuddet defineres som den mængde pasta, der ikke medgår til at fylde hulrummet i gru-

set. Pastaoverskuddet afhænger foruden v/c-forhold og bearbejdelighed også af pakningen.

Søjle A og B i figur 21 viser en rumfangsenhed tilslag, der i søjle C, D, E og F er tilsat pasta. I søjle D og F er grusmængden reduceret med et volumen svarende til pastatillægget.

Søjle A: En rumfangsenhed tilslag.

Søjle B: Billedet figur 21A er her vist skematisk (fast stof for sig, hulrum for sig). Billedet svarer til en grafisk fremstilling af pakningen.

Søjle C: Hulrummet vist i figur 21B er her fyldt med pasta. Herved fås pastaoverskuddet 0 liter pr. m³.

Søjle D: Her er fast stof substitueret med pasta. Den ekstra pasta er pastatillægget. Herved skabes også et pastaoverskud.

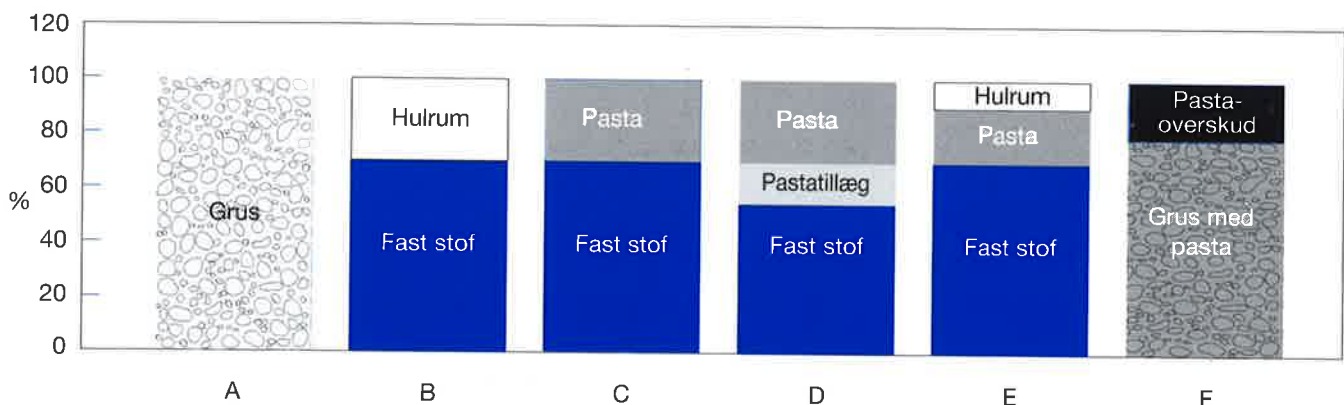
Søjle E: Et eksempel på pastaunderskud.

Søjle F: Sammenlignes søjle F med A ses det, at der er fjernet en del af gruset nemlig svarende til pastatillægget. Der medgår derfor ikke mere så meget pasta som oprindeligt til at fylde hulrummet i gruset. Pastaoverskuddet er derfor større end pastatillægget. Størrelsen af pastaoverskuddet kan findes ved at dividere pastatillægget med pakningen (V_2).

$$\text{Pastaoverskud} = \text{Pastatillæg}/V_2 \text{ (vol.\%)}$$

PROPORTIONERING EFTER HULRUM

En rumfangsenhed



Figur 21. Proportionering efter hulrum

Valg af pastatillæg

En lang række forsøg på Aalborg Portland's Cement- og Betonlaboratoriet (CBL) har vist, at bearbejdigheden er proportional med pastatillægget ved et givet v/c-forhold.

I figur 22 og 23 er angivet overslag for pastatillæg eller kitmassestillæg, når der er tilsat luft. Diagrammerne er baseret på normal tilsætning af plastificeringsstoffer (f.eks. 1% melamin). De viste diagrammer er kun vejledende, og endelig fastlæggelse af pastatillægget kan kun ske ved praktiske forsøg. I figur 22 – kitmassestillæg (pasta med luft) – er der indregnet 5% luft i pastamængden, og i figur 23 – pastatillæg (pasta uden tilsat luft) er der indregnet naturligt luft 1,5% i pastamængden. Sætmålet er baseret på optimerede flydeegenskaber af den aktuelle beton. Herved opnås, at der opstår en såkaldt kuglelejeeffekt i gruset. Kuglelejeeffekten fungerer på den måde, at de fine partikler i gruset virker som kuglelejer mellem de grove. Kuglelejeeffekten er omtalt allerede i 1966 af tidligere CtO-medarbejder Günther Grebin i [16].

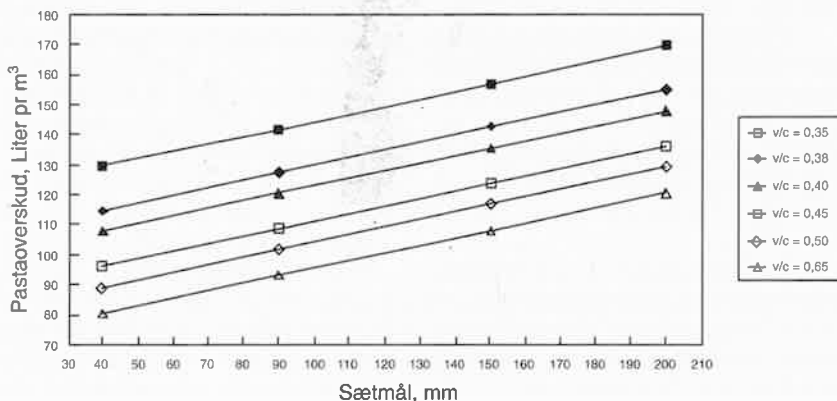
Diagrammerne for pastaoverskud passer bedst, når sætmål og omformningstal har en sammenhæng omtrent som vist i figur 24. I specielle tilfælde kan der være store afvigelser, idet der f.eks. med sætmål 150 mm kan opnås omformningstal fra 10 til 100 slag. Grunden er, at sætmål ikke generelt er et mål for bearbejdigheden, men mere et mål for betonens indre sammenhæng.

Praktisk fremgangsmåde ved proportionering

For at proportionere en beton findes først hulrummet i det aktuelle tilslag ved hjælp af en pakningsberegning. Herefter findes pastatillægget eller kitmassestillægget i diagrammerne ovenfor. Dette tillægges en pastamængde svarende til hulrummet i den aktuelle grussammensætning, og man har nu den pastamængde/kitmassemængde, der er nødvendig, for at få den bearbejdighed der ønskes. Tilslaget fordeles efter den aktuelle sammensætning, som er anvendt til at finde hulrummet i pakningsdiagrammet.

KITMASSEstillæg

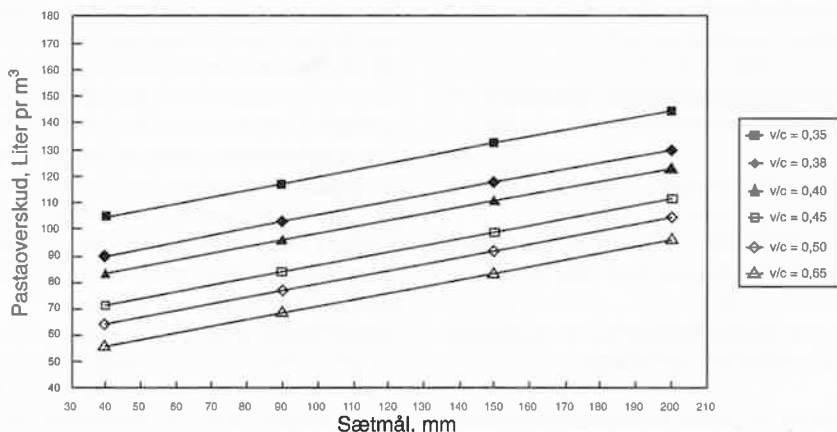
Med luft



Figur 22. Kitmassestillæg (pasta tilsat luft).

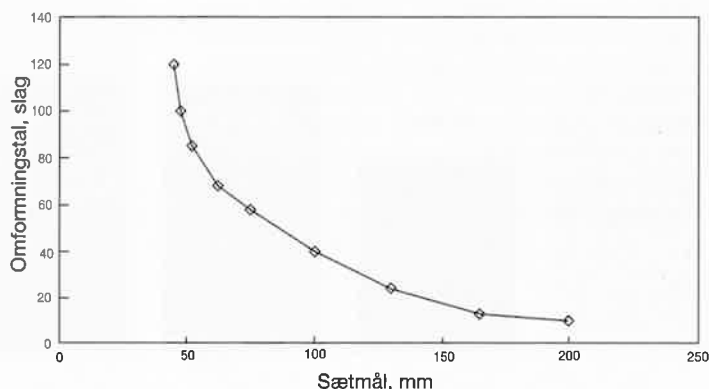
PASTATILLæg

Uden luft



Figur 23. Pastatillæg (pasta uden tilsat luft).

OMFORMNINGSTAL sammenlignet med sætmål



Figur 24. Normal sammenhæng mellem sætmål og omformningstal.

Eksempel:

Udvalget af tilslag er:

- Nr. Halne 0-4 mm
- RN Søsand 0-4 mm
- Dalby 4-8 mm
- Dalby 8-11 mm
- Dalby 11-16 mm
- Dalby 16-25 mm

Der gennemføres først en pakningsberegning med de største materialer, dvs. Dalby 8-11 mm, Dalby 11-16 mm og Dalby 16-25 mm. Resultatet ses i figur 25.

Det kan ses af figur 25, at det ikke er nødvendigt med fraktionen Dalby 11-16 mm for at opnå den bedste pakning. I de følgende pakningsberegninger sammensættes Dalby 8-11 mm og Dalby 16-25 mm til et materiale med en sammensætning på 50% af hvert materiale.

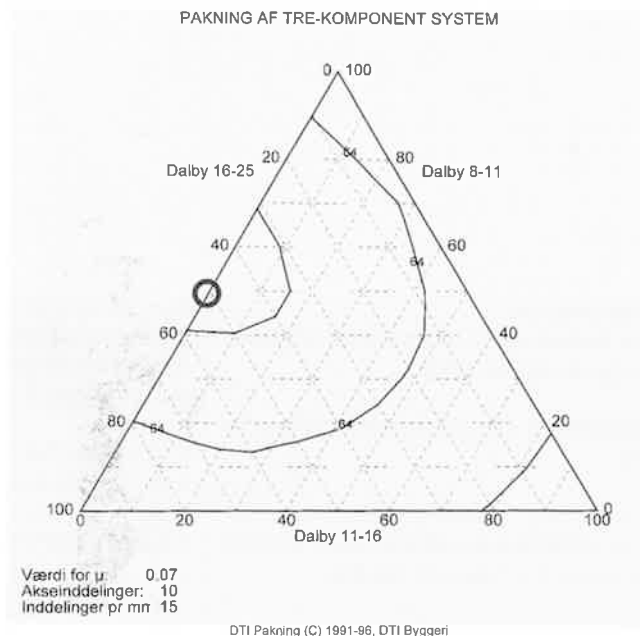
Resultatet af en pakningsberegning med RN Søsand 0-4 mm, Dalby 4-8 mm og det sammensatte materiale Dalby 8-11 mm og Dalby 16-25 mm ses i figur 26. En tilsvarende beregning, hvor sandet er Nr. Halne 0-4 mm ses i figur 27. Ud fra figur 26 og figur 27 ses, at fraktionen Dalby 4-8 mm ikke er nødvendig til at opnå den bedste pakning. Med Nr. Halne 0-4 mm kan opnås den samme pakning som med RN Søsand 0-4 mm, blot med lavere sand-%.

Det anbefales at benytte følgende materialer i følgende sammensætning:

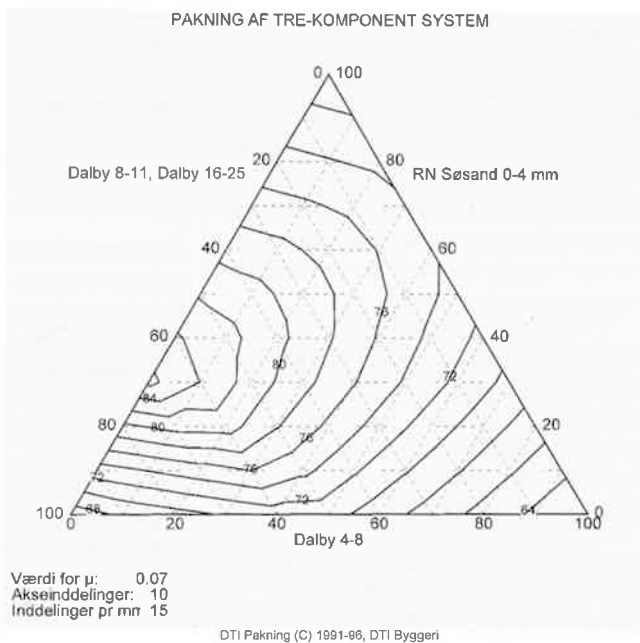
Nr. Halne 0-4 mm	38 volumen %
Dalby 8-11 mm	31 volumen %
Dalby 16-25 mm	31 volumen %

Dette resulterer i en pakning på 84%.

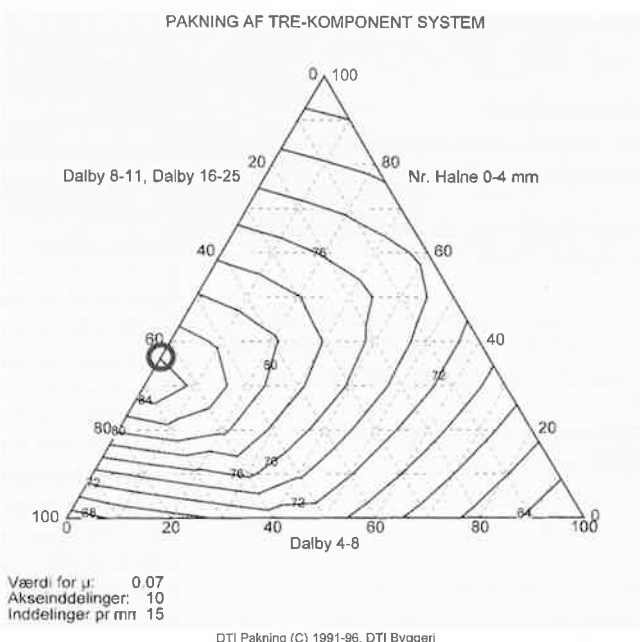
Figur 25. Pakningsberegning med Dalby 8-11 mm, Dalby 11-16 mm, Dalby 16-25 mm.



Figur 26. Pakningsberegning med RN Søsand 0-4 mm, Dalby 4-8 mm og en sammensætning af Dalby 8-11 mm (50%) og Dalby 16-25 mm (50%).



Figur 27. Pakningsberegning med Nr. Halne 0-4 mm, Dalby 4-8 mm og en sammensætning af Dalby 8-11 mm (50%) og Dalby 16-25 mm (50%).



Med tilsat luft

Der ønskes udført en prøveblanding med følgende egenskaber:

Sætmål 120 mm, v/c-forhold 0,40 og luft 5%.

I pakningsprogrammet aflæses en pakning på 84%. Herudfra bestemmes hulrummet i 1 m³ grus til 160 liter.

Kitmasse svarende til det oprindelige hulrum i 1 m ³ grus	160 l
Kitmassetillæg	(figur 22) 128 l
Kitmasse i alt	288 l

Nu kan mængden af grus udregnes	1000 - 288 = 712 l
I alt	1000 l

Den beregnede kitmasse kan anvendes direkte i et proportioneringsprogram. Alternativt findes cement- og vandindholdet på følgende måde:

Kitmasse = Cement + vand + luft + tilsætningsstoffer =	288 l
Luft =	50 l
Tilsætningsstoffer =	3 l
Cement + vand kan ud fra ovennævnte udregnes til	235 l

Vand/cement $\times 3,15$ (absolut densitet) = 0,4 \Rightarrow Vand = 1,26 \times cement
Cement + vand = 235 l \Rightarrow Cement + 1,26 \times cement = 235 l \Rightarrow 2,26 \times cement = 235 l
Cement = 235/2,26 = 104 liter eller
104 \times 3,15 = 328 kg
Vand = 235 - 104 = 131 liter

Uden tilsat luft:

Der ønskes udført en prøveblanding med følgende egenskaber:

Sætmål 120 mm, v/c-forhold 0,40 og naturligt luft 1,5%.

I pakningsprogrammet aflæses en pakning på 84%. Herudfra bestemmes hulrummet i 1 m³ grus til 160 liter.

Pasta svarende til det oprindelige hulrum i 1 m ³ grus	160 l
Pastatillæg (figur 23)	103 l
Pasta i alt	263 l

Nu kan mængden af grus udregnes	1000 - 263 = 737 l
I alt	1000 l

Den beregnede kitmasse kan anvendes direkte i et proportioneringsprogram. Alternativt findes cement- og vandindholdet på følgende måde:

Kitmasse = Cement + vand + luft + tilsætningsstoffer =	263 l
Luft =	15 l
Tilsætningsstoffer =	3 l

Cement + vand kan ud fra ovennævnte udregnes til 245 l.

Vand/cement $\times 3,15$ (absolut densitet) = 0,4 \Rightarrow Vand = 1,26 \times cement.

Cement + vand = 245 l \Rightarrow Cement + 1,26 \times cement = 245 l \Rightarrow 2,26 \times cement = 245 l

Cement = 245/2,26 = 108 liter eller
108 \times 3,15 = 340 kg

Vand = 240 - 108 = 132 liter

Sammenligning med Lyses Lov

Den her viste proportioneringsmetode er i det følgende sammenlignet med Lyses Lov (nævnt på side 2), idet der er udført en sammenligning med proportionering efter diagrammerne for pastatillæg og Lyses Lov ud fra et middelstyrkeniveau på 30 MPa.

Ifølge Lyses Lov er vandbehovet og bearbejdigheden for en given grussammensætning konstant og for et vist styrkeområde uafhængig af cementindholdet.

I forsøget er luftindholdet holdt konstant for alle styrkeklasser. Af figur 28 fremgår, at der er rimelig overensstemmelse mellem proportionerede værdier af vand- og cementindhold efter de 2 metoder.

Bearbejdigheden – se figur 29 – målt med omformningstal som funktion af styrkeklassen er også nogenlunde ens for alle styrkeklasser.

Det kan konstateres, at sætmålet falder (13 cm til 4 cm) med stigende styrkeklasse, selv om omformningstallet er nogenlunde konstant 28 til 35 slag. (Ifølge figur 24 vil en ændring i omformningstal fra 28 til 35 give en ændring i sætmål på 1 til 2 cm). Den store forskel i sætmål skyldes, at kohæsionen i betonen stiger med faldende v/c-forhold, og at sætmålet mere er mål for en betons kohæsion (sammenhængskraft/flydespænding) end for bearbejdigheden. Omformningstallet – [17] – giver et langt bedre mål for en betons flydeevne end sætmålet. Grunden til, at sætmålet er brugt her, er, at det stadig er langt det mest anvendte.

Afslutning

I denne publikation er det vist, at pakningen af tilslagsmaterialer kan beregnes ud fra en eksperimentelt bestemt egenpakning, en korndensitet og en korntørrelsesfordeling for hvert materiale. Pakningen er vist at være en funktion dels af størrelsesfordelingen dels af kornformen. Derudover er sammenhængen mellem pakningen af tilslagsmaterialerne og den tilsvarende betons egenskaber demonstreret.

Pakningsberegninger kan anvendes ved betonproportionering til at udvælge tilslagsmaterialer, til at bestemme sammensætningen af tilslagsmaterialer og til at bestemme den nødvendige pastamængde.

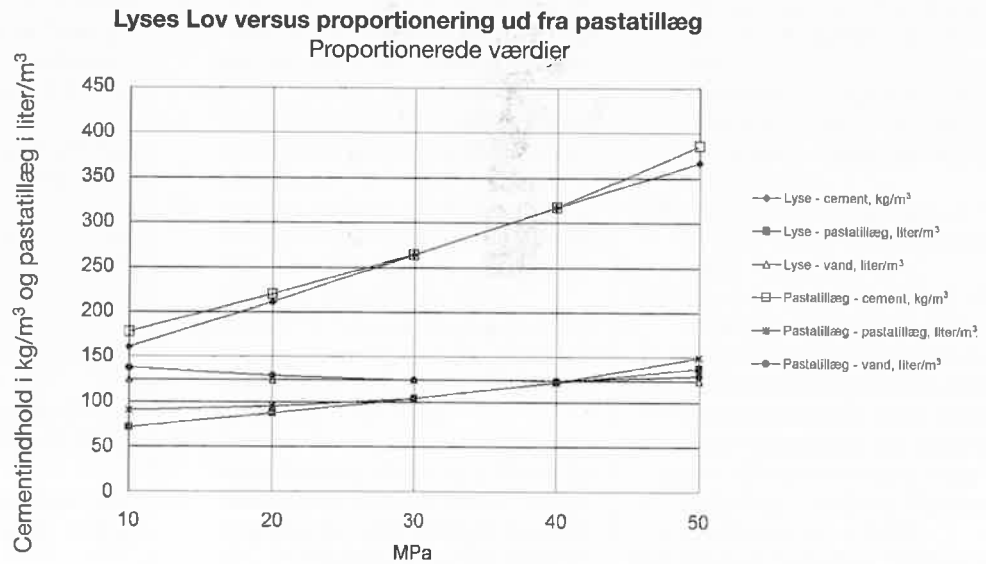
Et pakningsdiagram, der viser pakningen af samtlige kombinationer af udvalgte tilslagsmaterialer, giver et godt og overskueligt overblik over mulige tilslags sammensætninger i en beton og det kan ses, at det som regel er en pakningskombination med lille eller ingen mellemfraktion, der giver den bedste pakning. Dette er i god overensstemmelse med nyere proportioneringstraditioner med partikelspring i tilslaget.

Pakningsberegninger af tilslaget i velfungerende betoner, der er sammensat på baggrund af erfarings- og tommelfingerregler viser, at den anvendte tilslagskombination er i overensstemmelse med optimums området i pakningsdiagrammet, og at den anvendte pastamængde tilnærmelsesvis svarer til det hulrum, der er tilbage jf. den teoretiske pakningsberegning plus et pastatillæg. Pastatillægget er afhængigt af bl.a. vand/cement-forhold, luft og ønsket bearbejdighed.

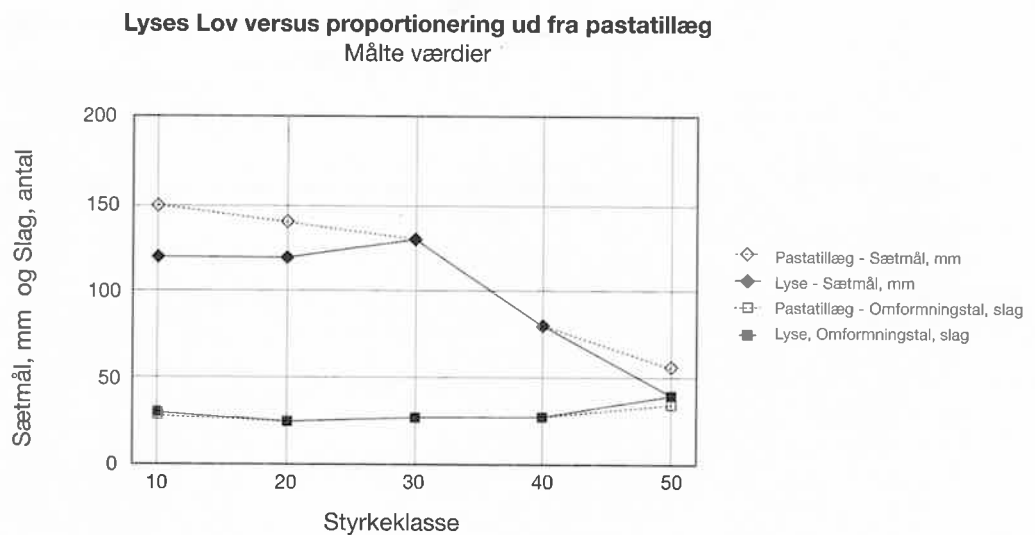
Anvendelsesmulighederne for pakningsberegninger af tilslagsmaterialer er mange, og anvendeligheden i forbindelse med fabriksbeton, betonvarer, betonelementer og betonveje er demonstreret. Derudover kan pakningsberegninger være et nyttigt hjælpeværktøj for grusproducenter til sammensætning og sortering af grusmaterialer.

Pakningsberegninger skal ses som et fysisk velbegrunderet alternativ eller supplement til traditionelle, empiriske proportioneringsmetoder og håndregler f.eks. Lyses Lov, som det er demonstreret, at der er god overensstemmelse med.

Figur 28. Lyses Lov versus proportionering ud fra pastatillæg. Proportionerede værdier.



Figur 29. Lyses Lov versus proportionering ud fra pastatillæg. Målte værdier.



Sætmålet falder ved stigende styrkeklasse; fordi kohæsionen stiger.

Litteratur

- [1] Bloem, D.L. & Gaynor, R.D.: "Effects of Aggregate Properties on Strength of Concrete", Journal of American Concrete Institute, 60, pp. 429-455, 1963.
- [2] Bache, Hans Henrik: "Flydeopførsel i Beton ved Betonfremstilling", Beton-Teknik, 3/14/1987.
- [3] Fuller, W.B. & Thompson, S.E.: "The Laws of Proportioning Concrete", Trans., ASCE, 59, 67-143, 1907.
- [4] Suenson, E.: "Byggematerialer III: Natursten, Lervarer, Mørtel, Beton, Kunst- en, Glas", 1911.
- [5] Powers, T.C.: "The Properties of Fresh Concrete", John Wiley & Sons Inc., New York, 1968.
- [6] Bache, Hans Henrik: "Ny Beton – Ny Teknologi", Beton-Teknik, 8/04/1992.
- [7] Furnas, C.C.: "Grading the Aggregates I-Mathematical relations for Beds of Broken Solids of Maximum Density", Ind. Eng. Chem. 23 (9), pp. 1052-58, 1931.
- [8] Johansen, V. & Just Andersen, P.: "Particle Packing and Concrete Properties, Materials Science of Concrete", (edited by Jan Skalby and Sidney Minders), 111-146. The American Ceramic Society, Inc. Westerville, Ohio.
- [9] Larsén, Anders: "Partikelpackning Proportionering av Betong", CBI Rapport 6:91, Cement och Betonginstitutet, Stockholm, 1991.
- [10] Stovall, T., Larrard, De F & Buil, M.: "Linear Packing Density Model of Grain Mixtures", Powder Technology 48, pp. 1-12, 1986.
- [11] Glavind, M. & Stang, H.: "A Geometrical Packing Model as a Basis for Composing Cement Paste Containing Clay for High Strength Concrete", Proceedings from the Third International Symposium on Brittle Matrix Composites, BMC3, (edited by A. M. Brandt and I. H. Marshall), pp. 518, September 1991.
- [12] Olsen, Gitte S. og Glavind, Mette: "Brugermanual til Pakningsprogram ver. 3", Byggeteknisk Institut, Juni 1993.
- [13] Thygesen, E. og Kronholm, F. L.: "Pakning af sand- og stenmaterialer i beton", Dansk Beton nr. 1, pp. 14-19, 1992.
- [14] Glavind, M. og Frandsen, J.: "Design af luft i beton", Dansk Beton nr. 1 1997.
- [15] Glavind, Mette og Olsen, Gitte S.: "Pakning af tilslagsmaterialer og frisk betons egenskaber, projekt udført i samarbejde med Unicon Beton I/S", Betoncentret DTI, April 1994.
- [16] Aage Borregaard og Günther Grebin: "Betonkornkurver med partikelspring", Aalborg Portlands Beton-Teknik nr. 1, 1966.
- [17] Michael Frømling: "Sådan kan betonens bearbejdighed måles", Dansk Beton nr. 3, 1995.
- [18] Ingolf Sørensen: "Betonvarebeton", Dansk Beton nr. 4, 1997.

© Løssalgspris kr. 50,- inkl. moms

Cto Cementfabrikkernes
tekniske Oplysningskontor
Rørdalsvej 44
Postboks 165
9100 Aalborg
Telf. 98 16 77 77

**AALBORG
PORTLAND**

