

ing. J.P. Straman, Technische Universiteit Delft

ir. E.H. Geldof, Corsmit Raadgevend Ingenieursbureau bv, Rijswijk

Voor Europese gebouwen, hoger dan circa 100 m, wordt dikwijls een constructiesysteem met één of meer stijve kernen minder aantrekkelijk. Om namelijk de vereiste stijfheid te kunnen leveren worden de afmetingen van de kernen dermate groot, dat zij een relatief groot gedeelte van de plattegrond beslaan, waardoor het nuttige (dus verhuurbare) gedeelte afneemt. Een mogelijkheid om toch met een slanke kern aan alle constructieve eisen te voldoen, is het aanbrengen van een overdrachtsconstructie, waarbij gevelkolommen worden geactiveerd bij het opnemen van de horizontale belasting. De bijdrage van de kolommen kan daarbij worden gevarieerd, waardoor een grotere vrijheid ontstaat voor het dimensioneren van de kern. De afmetingen kunnen worden bepaald uit functionele overwegingen. Bij de enige constructie die tot nu toe in Nederland op deze wijze is uitgevoerd [1], bedraagt de breedte-hoogte verhouding van de kern circa 1:20, hetgeen zeer slank is.

# TIJDSAFHANKELIJK GEDRAG VAN VERSTIJFDE KERNCONSTRUCTIES

Na het aanbrengen van de verbindingen tussen kern en gevelkolommen zal door het tijdsafhankelijk gedrag van beton, in de verstijfde kernconstructie herverdeling van spanningen en krachten plaatshebben. Om hierin meer inzicht te krijgen is een rekenmodel ontwikkeld, waarmee de invloed van dit tijdsafhankelijke materiaalgedrag, veroorzaakt door krimpen en kruipen, op het mechanisch gedrag van de verstijfde kernconstructie kan worden nagegaan.

## Constructief gedrag

Wanneer op de verstijfde kern een horizontale belasting werkt, buigt deze uit en wil de overdrachtsconstructie roteren, hetgeen door de gevelkolommen wordt verhinderd. In de kolommen aan de loefzijde ontstaan zo trekkrachten, in die aan de lijzijde drukkrachten (fig. 1).

Aan de buig- en afschuifstijfheid van de overdrachtsconstructie worden hoge eisen ge-

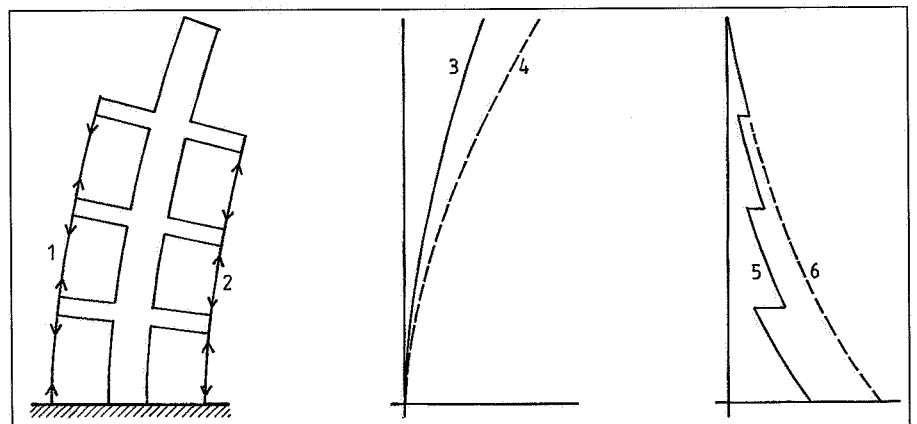
steld, waardoor deze als een zware stalen of betonnen constructie wordt uitgevoerd, vaak één of twee verdiepingen hoog (fig. 2). Het aantal overdrachtsconstructies en de positionering in de gebouwhoogte zal meestal in samenspraak met de architect worden bepaald. In deze studie zijn de verschillende alternatieven zodanig ontworpen, dat de overdrachtsconstructies optimaal zijn gepositioneerd met betrekking tot de uitbuiging van de constructie.

## Tijdsafhankelijk gedrag van beton

Als in een betonconstructie de betonspanningen in de tijd variëren ten gevolge van een herverdeling van spanningen tussen beton en betonstaal en/of een variërende uitwendige belasting, treden complicaties op bij de tijdsafhankelijke spanningen en vervormingen. De kruipfactor  $\varphi_t$  is namelijk gedefinieerd voor een constante belasting, terwijl de elasticiteitsmodulus ook tijdsafhankelijk is.

### ① Constructief gedrag verstijfde kern

1. trekkolommen aan loefzijde
2. drukkolommen aan lijzijde
3. uitbuiging verstijfde constructie
4. uitbuiging zonder verstijving
5. moment in kern met verstijving
6. moment in kern zonder verstijving



Voor praktische berekeningen zijn diverse benaderingsmethoden ontwikkeld die het werkelijke tijdsafhankelijke gedrag van beton, dat door de vervormings- of kruipfunctie  $\varphi_t$  wordt beschreven, zo goed mogelijk benaderen.

In dit onderzoek is gebruik gemaakt van de AAEM-methode (Age Adjusted Effective Modulus method), ook wel de methode Trost genoemd.

Bij deze benaderingsmethode (waarop hier niet nader wordt ingegaan), wordt uitgegaan van een eenheidskruipcoëfficiënt  $\varphi(t, \tau)$  ( $t$  is ouderdom beton,  $\tau$  is belastingstijd), behorend bij het tijdstip  $\tau_0$  waarop de eerste belasting wordt aangebracht. De invloed van het verouderen van beton voor later aangebrachte belastingen kan in rekening worden gebracht met een verouderingscoëfficiënt  $\rho(t, \tau)$ :

$$E_{\text{eff}}^*(t) = \frac{E_b'(\tau_0)}{1 + \rho(t, \tau_0) \cdot \varphi(t, \tau_0)}$$

De benaderingsmethode veronderstelt eveneens een in de tijd constante elasticiteitsmodulus  $E_b'(\tau) = E_b'(\tau_0)$ . Hier is de AAEM-methode voor de invloed van de wapening toegepast. Bij de vaststelling van de uitwendige belasting per verdieping is uitgegaan van de juiste ouderdom.

Door het toepassen van een geschikte waarde voor  $\rho(t, \tau)$  benadert deze tijdsafhankelijke modellering het tijdsafhankelijke gedrag zodanig, dat een pseudo-elastische berekening kan worden gemaakt.

Voor de kruipcoëfficiënt en de specifieke krimpverkortings is de VBC aangehouden.

### Tijdsafhankelijk gedrag constructie

Indien de overdrachtsconstructie nog niet is aangebracht (fig. 3), kunnen kern en gevelkolommen in verticale zin onafhankelijk van elkaar bewegen (de vloeren zijn scharnierend verbonden aan kern en gevelkolommen).

Door de verticale belastingen staan de kern en de kolommen, beide hier uitgevoerd in gewapend beton, onder centrische druk. De elastische krimp- en kruipverkortingen die hiervan het gevolg zijn, kunnen vrij optreden, waardoor de krachtsverdeling over kern en kolommen niet wordt gewijzigd. In de elementen zelf treedt wel herverdeling op, waardoor de betonspanningen in de loop der tijd zullen afnemen. Het scheurmoment van de kern neemt daardoor af. Aangezien de kern ook de horizontale belasting opneemt, wordt de mate waarin de kern

scheurt dus groter. De kromming van de kern (en daarmee de uitbuiging) als gevolg van horizontale belastingen zal door kruipvervormingen eveneens aangroeien in de tijd. Door de verhoogde mate van scheurvorming bij horizontale belasting nemen de stijfheid en de stabiliteit van de kern dus af in de loop der tijd.

Nu wordt op een bepaald tijdstip de overdrachtsconstructie, die de kern en de kolommen met elkaar verbindt, in deze symmetrische constructie geplaatst (fig. 4). Indien er eenvoudigheidshalve van wordt uitgegaan dat de overdrachtsconstructie oneindig buigstijf is, moet vanaf het tijdstip van plaatsing de verdere verplaatsing van de kern gelijk zijn aan die van de kolommen. Dit betekent dat er nu sprake is van een verhinderde vervorming van de kern en de kolommen. Er moet dus een additionele krachtsverdeling ontstaan om aan deze compatibiliteitsvoorwaarde te kunnen voldoen. Door de overdrachtsconstructie wordt dan ook een dwarskracht  $T(t)$  overgedragen die zich, evenals de nog resterende krimp- en kruipvervormingen van de kern en de kolommen, in de tijd ontwikkelt. Door de wijziging in het constructief systeem verandert dus de krachtsverdeling over de kern en de kolommen.

### Berekeningen

#### Schematisering

De schematisering van de constructie is in de figuren 5 en 6 weergegeven.

De kern is ingeklemd in de fundering, terwijl de overdrachtsconstructie is ingeklemd in de kern en scharnierend is verbonden met de gevelkolommen.

Ter vereenvoudiging is aangenomen dat de buigstijfheid van de vloeren verwaarloosd kan worden, dat er geen interactie is tussen 'gewone' en overdrachtsgevelkolommen en dat van een oneindig stijve ondergrond kan worden uitgegaan. De doorsnedegrootheden zijn over de hoogte constant verondersteld.

#### Belastingen

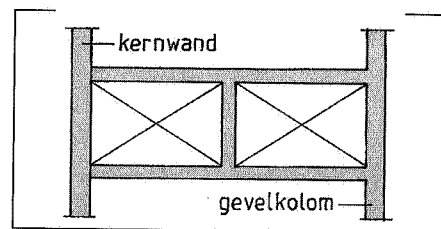
Er zijn twee belastingen gedefinieerd:

- verticale belasting.

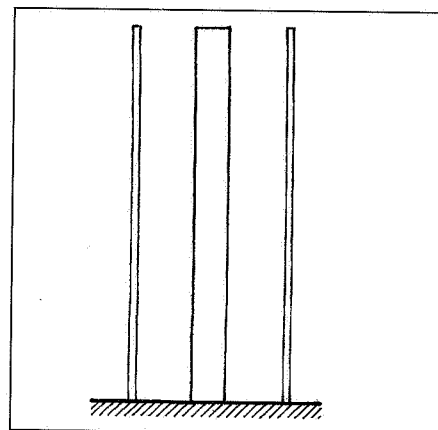
Dit is een langeduurbelasting en geeft zowel elastische als tijdsafhankelijke vervormingen;

- windbelasting.

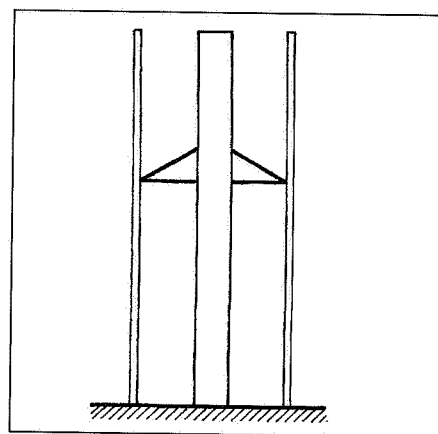
Dit is een korteduurbelasting en levert in principe alleen elastische vervormingen op.



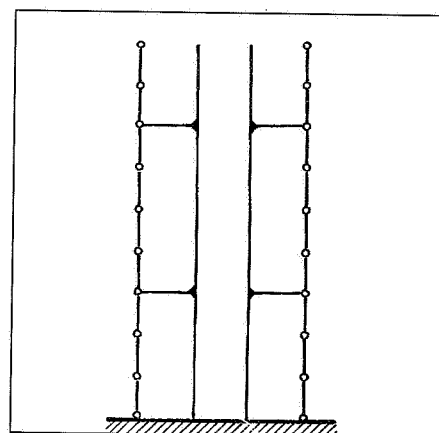
② Overdrachtsconstructie



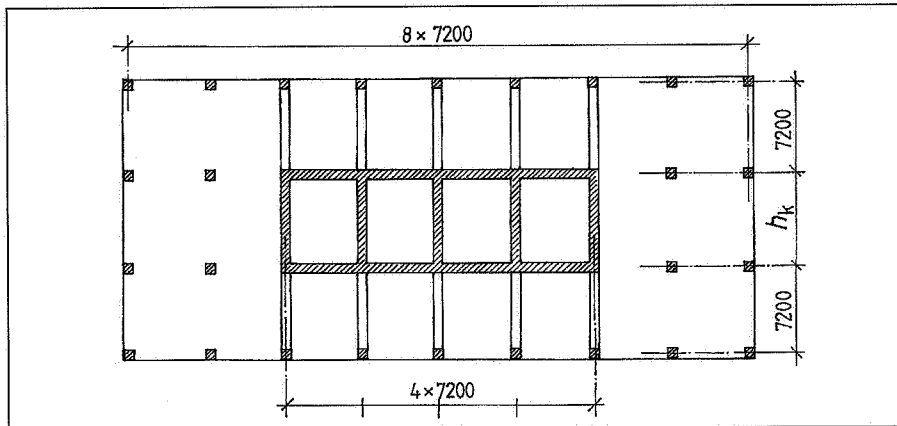
③ Onverstijfde constructie



④ Verstijfde kernconstructie



⑤ Schematisering



$h_k$  = hoogte horizontale doorsnede kern (zie fig. 6);

$EI_k$  = buigstijfheid kern;

$EA_k$  = rekstijfheid kern;

$EA_g$  = rekstijfheid overdrachtskolom;

$EI_o$  = buigstijfheid overdrachtsconstructie.

Iedere overdrachtsconstructie bestaat uit tien uitkragende liggers (fig. 6). Het aantal overdrachtsconstructies is gevarieerd, terwijl de plaats ervan in hoogterichting van het gebouw zo is gekozen dat een maximale reductie van de uitbuiging wordt verkregen [2]. Er geldt dat hoe slanker de kern, hoe zwaarder deze verstijfd dient te worden. Globaal neemt de mate van verstijving toe met oplopend alternatief-nummer.

**Resultaten**

*Verticale belasting (elastische en tijdsafhankelijke herverdeling)*

In tabel 2 zijn de dwarskrachten in de overdrachtsconstructies weergegeven als gevolg van de elastische en tijdsafhankelijke herverdeling.

In tabel 3 zijn de normaalkrachten in de kern en de kolommen onder verticale belasting weergegeven, zonder en met herverdeling.

Geconstateerd kan worden:

- Elastische herverdeling leidt tot hogere normaalkrachten in de kern. De verhouding van de belastingen kern/gevelkolom en de verhouding van de rekstijfheden kern/gevelkolom liggen hieraan ten grondslag. De elas-

⑥ *Plattegrond, kern met tien uitkragende liggers*

*Rekenprogramma*

De berekeningen zijn uitgevoerd met een lineair-elastisch raamwerkprogramma en met behulp van een spreadsheet. Als de scheurbelasting in een element werd overschreden, is de stijfheid van dat element aangepast.

*Uitgangspunten*

Als uitbuigingseis is aangehouden:

$$u \leq 1/800 H$$

De bruikbaarheidseis is maatgevend.

De invloed van de fundering is verwaarloosd.

*Alternatieven*

Er zijn vijf alternatieven ontwikkeld, waarvan de belangrijkste kentallen in tabel 1 zijn weergegeven.

In deze tabel is:

$H$  = hoogte kern;

Tabel 1

Onderzochte alternatieven

alternatief	aantal verdiepingen	H (m)	$h_k$ (m)	kern-slankheid	$EI_k$ ( $10^6$ MNm <sup>2</sup> )	$EA_k$ ( $10^5$ MN)	$EA_g$ ( $10^4$ MN)	$EI_o$ ( $10^5$ MNm <sup>2</sup> )	overdrachtsconstr.	
									aantal	plaats (verd.)
1	40	136	10,8	1 : 13	17,28	10,07	8,18	9,20	1	26
2	40	136	10,8	1 : 13	17,28	10,07	8,18	4,00	2	20, 31
3	40	136	9,0	1 : 15	11,20	9,48	11,45	9,10	2	17, 29
4	40	136	7,2	1 : 19	7,14	8,66	15,26	16,80	2	15, 29
5	50	170	10,8	1 : 16	17,28	10,07	19,22	18,00	3	16, 26, 40

Tabel 2

Dwarskrachten in 1e, 2e en 3e overdrachtsconstructie in  $10^3$  kN als gevolg van herverdeling

alternatief	elastische herverdeling			tijdsafh. herverdeling			totale herverdeling		
	1° oc	2° oc	3° oc	1° oc	2° oc	3° oc	1° oc	2° oc	3° oc
1	-5,6	-	-	2,3	-	-	-3,3	-	-
2	-3,0	-1,2	-	0,6	1,3	-	-2,4	0,1	-
3	-3,3	-1,6	-	1,8	3,3	-	-1,5	1,7	-
4	-2,6	-1,2	-	2,8	5,6	-	0,2	4,4	-
5	-0,7	-0,7	-0,3	2,6	3,6	6,6	1,9	2,9	6,3

tische herverdeling neemt af naarmate de kern zwaarder verstijfd is. De gevelkolommen zijn bij zwaar verstijfde kernconstructies immers relatief stijf uitgevoerd, waardoor hun elastisch vervormingsgedrag meer overeenkomt met dat van de kern. De extra belasting op de kern door deze herverdeling kan oplopen tot 5% en de ontlasting van de kolommen tot 13%.

- De tijdsafhankelijke herverdeling leidt tot hogere kolombelastingen. Door het hogere wapeningspercentage gedragen de kolommen zich met betrekking tot krimp- en kruipvervormingen stijver. Deze herverdeling neemt toe naarmate de kern zwaarder verstijfd is. De tijdsafhankelijke ontlasting van de kern kan oplopen tot 10%, terwijl de extra belasting op de kolommen kan oplopen tot ruim 20%.

- Beide herverdelingen hebben een tegengestelde richting. Welke absoluut de grootste is en welke richting de uiteindelijk resulterende herverdeling heeft, hangt af van de mate van verstijving. Zeer globaal kan worden gesteld dat bij kernslankheden tot 1:14 (licht verstijfde kernen) de elastische herverdeling overheerst en voor slankere (en zwaar verstijfde) kernen de tijdsafhankelijke.

#### Horizontale belasting

In tabel 4 zijn de dwarskrachten in de overdrachtsconstructies weergegeven ten gevolge van de windbelasting. De verhoudingen tussen de dwarskrachten door verticale herverdelingen en die door horizontale belastingen zijn in de laatste kolommen opgenomen.

Uit tabel 4 blijkt dat verwaarlozing van herverdeling door verticale belasting tot onderschatting van de krachten in de overdrachtsconstructie leidt van 1 tot 57% volgens:

$$\frac{8,5}{6,3 + 8,5} \cdot 100\% \quad (\text{voor } 6,3 \text{ zie tabel } 2).$$

#### Parameterstudie

Met alternatief 1 zijn de volgende parameters gevarieerd:

- wapeningspercentage van de gevelkolommen;
- bouwsnelheid;
- voorlopen van de kern;
- moment van aanbrengen van de overdrachtsconstructie;
- verouderingscoëfficiënt voor aangroeiende belastingen;

Tabel 3

Normaalkrachten in kern en kolommen in  $10^3$  kN, zonder en met herverdeling

alternatief	zonder herverdeling		met herverdeling	
	kern	kolom	kern	kolom
1	-216,0	-44,0	-222,6	-40,7
2	-216,0	-44,0	-220,7	-41,7
3	-192,0	-44,0	-191,6	-44,2
4	-172,0	-44,0	-163,0	-48,5
5	-270,0	-55,0	-247,8	-66,1

Tabel 4

Dwarskrachten in 1e, 2e en 3e overdrachtsconstructie uit horizontale belasting en extra dwarskrachten door verticale herverdeling

alternatief	dwarskrachten ( $10^3$ kN)			extra dwarskrachten (%)		
	1 <sup>e</sup> oc	2 <sup>e</sup> oc	3 <sup>e</sup> oc	1 <sup>e</sup> oc	2 <sup>e</sup> oc	3 <sup>e</sup> oc
1	10,5	-	-	31	-	-
2	6,0	5,1	-	41	2	-
3	11,6	8,2	-	13	20	-
4	17,7	10,3	-	1	43	-
5	15,7	12,6	8,5	12	23	75

Tabel 5

Invloed tijdstip aanbrengen overdrachtsconstructie

weken na aanvang bouw	dwarskrachten ( $10^3$ kN)			normaalkrachten ( $10^3$ kN)	
	elast.	tijdsafh.	totaal	kolom	kern
26	-5,6	2,3	-3,3	-40,7	-222,6
33	-3,0	1,9	-1,2	-42,9	-218,3
40	-0,4	1,5	1,2	-45,2	-213,7

- aandeel krimp en kruip;
- verhouding krimp- en kruipwaarden tussen kern en kolommen;
- opneembare trekspanning;
- verouderingscoëfficiënt voor constante belastingen.

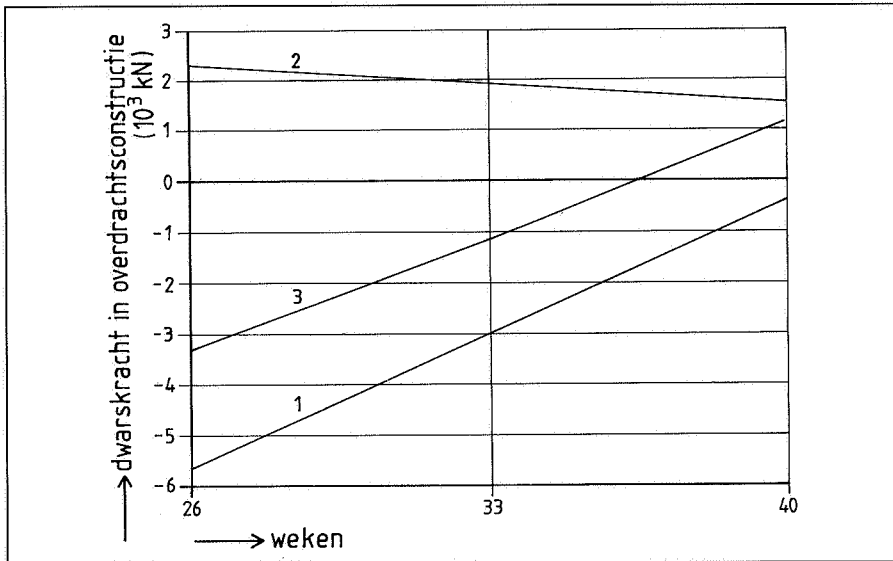
Van de interessante resultaten wordt hier alleen de invloed van het moment van aanbrengen van de overdrachtsconstructie op het tijdsafhankelijke gedrag besproken.

In tabel 5 zijn de relevante waarden gegeven bij aanbrengen van de overdrachtsconstructie na respectievelijk 26, 33 en 40 weken na aanvang van de bouw. De overdrachtsconstructie bevindt zich op de 26e verdieping, die na 26 weken wordt bereikt.

De elastische herverdeling wordt aanzienlijk

beïnvloed door het tijdstip van sluiten. Des te later, des te kleiner de herverdeling, daar het aantal belastingsveranderingen dat wordt herverdeeld dan kleiner is.

De tijdsafhankelijke herverdeling neemt eveneens af naarmate de overdrachtsconstructie later wordt gesloten. De invloed is echter kleiner, daar deze herverdeling over een zeer lange tijd ontstaat. Naarmate de overdrachtsconstructie later wordt gesloten, zal een groter deel van de elastische krimp- en kruipvervormingen vrij kunnen optreden. Tevens is dan de extra drukkracht op de kolommen kleiner, maar de ontlasting door de elastische herverdeling is belangrijk minder.



⑦ Invloed tijdstip sluiten overdrachtsconstructie

1. elastische herverdeling
2. tijdsafhankelijke herverdeling
3. totale herverdeling

De uiteindelijk resulterende dwarskracht in de overdrachtsconstructie is dus sterk afhankelijk van het tijdstip van sluiten. Omdat beide herverdelingen afnemen naarmate de overdrachtsconstructie later wordt gesloten, zal de kracht hierin eveneens afnemen. In deze constructie is bij een snelle sluiting de elastische herverdeling dominant en bij een late sluiting de tijdsafhankelijke (fig. 7).

Het blijkt dat een vroege sluiting bij licht verstijfde kernconstructies gunstig is voor het scheurmoment van de kern en ongunstig voor de scheurkracht van de kolommen. Bij zwaar verstijfde kernconstructies is de elastische herverdeling klein, zodat er voor de kern weinig elastisch herverdeelde drukkracht verloren gaat bij een vroege sluiting. Een late sluiting kan dan gunstig zijn voor het scheurmoment omdat de tijdsafhankelijke herverdeling kleiner is. Het omslagpunt is afhankelijk van de verhouding in de elastische en tijdsafhankelijke herverdeling.

**Conclusies**

Slechts een klein deel van de studie [3] is besproken. Uit het totale onderzoek kan echter het volgende worden geconcludeerd.

1. Bij kernen met overdrachtsconstructies treedt herverdeling van krachten op:
  - door elastische herverdeling wordt de kern zwaarder belast en worden de kolommen ontlast. De verhouding van de rekstijfheden en van de belastingen tussen kern en kolom speelt hierbij een overheersende rol;
  - door tijdsafhankelijke herverdeling vindt het omgekeerde plaats. Het verschil in wapeningspercentage speelt een overheersende rol.

2. De dwarskrachten in de overdrachtsconstructies kunnen door de herverdeling van verticale belasting oplopen tot 75% van die uit horizontale belastingen (tabel 4).

3. Bij licht verstijfde kernconstructies (slankheid < circa 1:14) overtreft de elastische herverdeling de tijdsafhankelijke. Bij zwaar verstijfde kernconstructies is dit andersom.

4. Bij de onderzochte alternatieven varieert de uiteindelijke kracht in de kern van 97% tot 109% van de kracht die optreedt bij onverhinderde verkortingen. Voor de kolommen varieert dit van 108% tot 83%.

5. De tijdsafhankelijke herverdeling wordt voor het grootste deel door de krimpverkortingen veroorzaakt; de hoge ouderdom bij belasten zorgt voor relatief kleine kruipvormingen.

6. De elastische herverdeling is groter naarmate de overdrachtsconstructie lager in het gebouw is geplaatst; de tijdsafhankelijke herverdeling is groter naarmate de overdrachtsconstructie hoger is geplaatst.

7. Daar de uitbuiging nauwelijks wordt beïnvloed door herverdeling, kan bij een globale ontwerpberekening de herverdeling in eerste instantie worden verwaarloosd.

Bij de definitieve dimensionering moet echter wel rekening worden gehouden met herverdeling uit verticale belasting. Vereenvoudigingen daarbij kunnen zijn:

- breng de herverdeling elastisch in rekening (overschatting maximaal 20%);
- voor de berekening kunnen meer verdiepingen tot één element worden samengevoegd, zonder veel verlies aan nauwkeurigheid.

**Literatuur**

1. Kraus, J.G. en R.H.Wiltjer, Constructie van hoofdkantoor CLBN. *Cement* 1996, nr. 1.
2. Stafford Smith, B. and I. Salim, Parameter study outrigger-braced tall building structures. *Journal of the Structural Division ACE*, Oktober 1981.
3. Geldof, E.H., Tijdsafhankelijk gedrag van verstijfde kernconstructies. *Afstudeerrapport TU Delft*, mei 1996.