

### 8.5 Vervormingen in de diverse moten

Op een drietal moten van de brug zijn ten behoeve van monitoring meetpuntjes aangebracht. Met behulp van deze meetpuntjes kan de vervorming van de moot gemeten worden. Dit wordt gedaan door middel van een zeer nauwkeurig meetapparaat dat de afstand tussen de diverse meetpuntjes kan meten. Hierdoor kan de verlenging of verkorting van de moot bepaald worden. In een drietal moten van de laatst gebouwde kraagarm zijn deze meetpuntjes aangebracht, te weten in moot 2, 13 en 15. Moot 2 is de moot dicht bij het hamerstuk van steunpunt 3. Moot 15 is de moot voorafgaand aan de sluitmoot in het midden van de hoofdoverspanning. De gemeten vervormingen aan deze drie moten zullen hier besproken en vergeleken worden met vervormingen die met behulp van Bridges zijn bepaald. Verder zullen ook de berekende spanningen in de betreffende moten worden weergegeven. Deze spanningen zijn ook met behulp van Bridges bepaald. Voor het berekenen van de vervormingen en de spanningen, is er gebruik gemaakt van het invoerfile met de aangepaste data en van het aangepaste materialen-file. In het aangepaste invoerfile zijn data zoals de stortdata aangepast aan de werkelijke bouw. In het aangepaste materialen-file (*Prak. ber. \**) zijn de getunedede materiaal gegevens gebruikt. Deze twee files zijn ook in de vorige paragrafen gebruikt.

Om de vervormingen te bepalen die met behulp van Bridges zijn berekend, is gebruikt gemaakt van de uitvoer van Bridges. Bridges bepaalt voor een bepaalde moot de zakking (verticaal), de verplaatsing (horizontaal) en de hoekverdraaiing voor knooppunten. Elke moot heeft slechts 2 knooppunten, elk voor de aansluiting van de volgende en vorige moot. Uitgaande van de theorie dat vlakke doorsneden vlak blijven kan voor elk willekeurig punt op een moot, de vervorming worden bepaald. Zo ook voor de plaatsen waar meetpunten in de moot zijn aangebracht.

De spanningen zijn gemakkelijker te bepalen. In de uitvoer van Bridges worden spanningen op een bepaald tijdstip weergegeven voor de 4 hoekpunten (in zij-aanzicht) van een moot. Hiermee kunnen eenvoudig (uitgaande van een rechthoekig spanningsfiguur) de spanningen ter plaatse van de meetpunten bepaald worden. In eerste instantie waren er op de moten geen meetpuntjes aanwezig. De vervormingen werden gemonitord door wapeningsstaven in moten 13 en 15 uit te rusten met rekstrookjes. Deze wijze van meten bleek echter zeer gevoelig voor stroomstoringen. Na een grote stroomstoring in Almere (1997), waarbij er een volledige dag geen stroom aanwezig was, bleken de rekstrookjes niet meer te functioneren. Op de dummy's die in de brug aanwezig zijn, waren meetpuntjes aanwezig. Deze meetpuntjes functioneerden beter dan verwacht. Daarom is besloten om de wanden van moten 2, 13 en 15 te voorzien van meetpuntjes. Deze meetpuntjes meten de totale vervormingen (krimp + kruip). Van de dummy's zijn krimpmetingen bekend, zie figuur 7.8. Indien nu deze krimpvervormingen in mindering worden gebracht op de vervormingen gemeten aan de meetpuntjes, blijft de kruipvervorming (incl. elastische vervorming) over. Deze kruipvervorming is weergegeven in de grafieken in deze paragraaf, ook Bridges kan zonder krimpvervorming rekenen, dat is dan ook in deze paragraaf gebeurd.

#### 8.5.1 Moot 2

Op het moment dat de meetpuntjes in de moten werden aangebracht, was moot 2 al een aantal maanden oud. Vandaar dat in de grafiek op de volgende pagina en in het overzicht hieronder de eerste meting aan de meetpuntjes 193 dagen na storten plaats vond.

Om vervormingen en spanningen in de grafieken te verklaren wordt voor elke moot een overzicht weergegeven van gebeurtenissen. Het storten van moot 3 t/m het storten van de laatste moot zijn niet in het onderstaande overzicht weergegeven, vanwege het feit dat erdoor het overzicht erg groot en onoverzichtelijk zou worden. En verder vanwege het feit dat al deze gebeurtenissen toch niet zijn gemeten bij het monitoren.

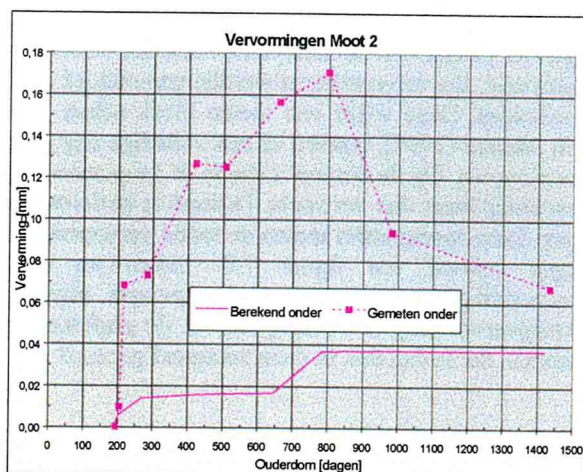


De gebeurtenissen zijn:

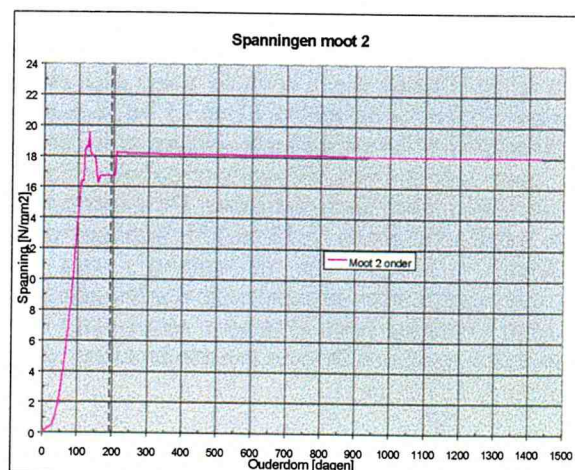
Dag	Gebeurtenis	Punt in grafiek	Opmerking
0	Storten moot	ja, oorsprong	Datum: 19-12-1996
130	Storten sluitmoot (midden)	nee	3 dagen later ontkist
133	1 <sup>e</sup> Deel continuïteitsvoersp. (60%)	nee	
154	Continuïteitsvoerspanning (100%)	nee	
193	1 <sup>e</sup> Meting aan meetpuntjes	ja, nulmeting	Punt ligt op x-as, Datum: 30-06-1997
204	2 <sup>e</sup> Meting aan meetpuntjes	ja	
208	Aanbrengen asfalt	nee	
217	3 <sup>e</sup> Meting aan meetpuntjes	ja	
284	4 <sup>e</sup> Meting aan meetpuntjes	ja	
419	5 <sup>e</sup> Meting aan meetpuntjes	ja	
505	6 <sup>e</sup> Meting aan meetpuntjes	ja	
658	7 <sup>e</sup> Meting aan meetpuntjes	ja	
797	8 <sup>e</sup> Meting aan meetpuntjes	ja	
981	9 <sup>e</sup> Meting aan meetpuntjes	ja	
1433	10 <sup>e</sup> Meting aan meetpuntjes	ja, laatste puntje	Datum: 06-12-2000

Hieronder zijn de vervormingen en de spanningen in de figuren weergegeven. In moot 2 is één rij meetpuntjes aanwezig. In de andere twee moten, zijn per moot twee rijen meetpuntjes aanwezig. De rij meetpuntjes in moot 2 bevindt zich op ongeveer 80 cm hoogte boven de vloer, aan de binnenzijde van de koker.

De vervormingen zijn weergegeven vanaf 193 dagen na storten. De berekende spanningen zijn vanaf het moment van het storten van de moot weergegeven. In de figuur is dan ook goed te zien wanneer de continuïteitsvoerspanning en het asfalt worden aangebracht. De in de figuren weergegeven vervormingen, zijn verkortingen van de moten.



Figuur 8.14 Vervormingen moot 2



Figuur 8.15 Berekende spanningen moot 2

Opmerking: In bovenstaande en navolgende figuren is een positieve vervorming een verkorting, en een positieve spanning een drukspanning.

Opvallend is dat de gemeten vervormingen veel groter zijn dan de berekende vervormingen. Mede vanwege het feit dat vanaf het tijdstip van meten geen spanningsveranderingen hebben plaatsgevonden. Bij de berekende vervormingen nemen de vervormingen dan ook nauwelijks toe. De sprong na 600 dagen is toe te schrijven aan vertraagd elastische vervormingen, de sprong ontstaat door afrondingen in de door Bridges uitgevoerde resultaten. Verder valt op dat de gemeten vervormingen fluctueren, terwijl er dus geen verandering meer optreedt in het spanningsverloop van de brug. De schommelingen zouden toe te kunnen schrijven zijn aan seizoenswisselingen, de gemeten vervormingen zijn echter gecorrigeerd op temperatuur. Vooral de plotselinge afname in vervorming bij 800 dagen is zeer opmerkelijk. De oorzaak hiervan zal verderop in dit hoofdstuk nader onderzocht worden.



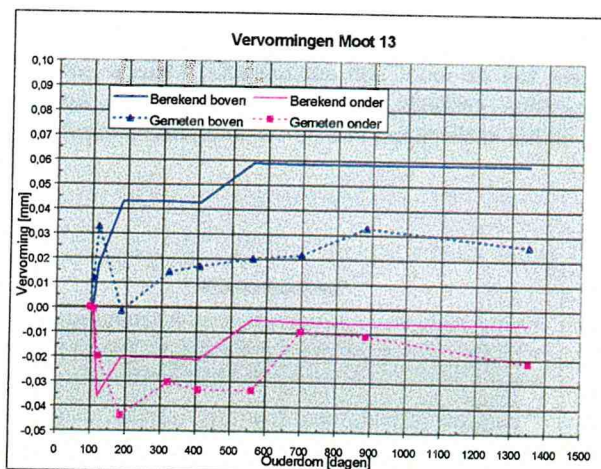
## 8.5.2 Moot 13

In moot 13 en 15 zijn twee rijen meetpuntjes aanwezig. De bovenste rij bevindt zich op ongeveer 20 cm onder het dak van de koker. De onderste rij bevindt zich 1,20 meter lager. De totale hoogte van beide moten is 2,50 m.

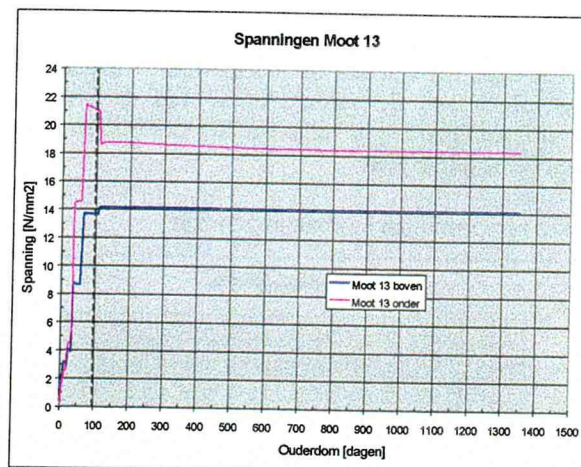
De gebeurtenissen voor moot 13 zijn:

Dag	Gebeurtenis	Punt in grafiek	Opmerking
0	Storten moot 13	ja, oorsprong	Datum: 27-3-97
32	Storten sluitmoot (midden)	nee	
35	1 <sup>e</sup> deel continuïteitsvoersp. (60%)	nee	
56	Continuïteitsvoerspanning 100 %	nee	
95	1 <sup>e</sup> meting aan meetpuntjes	ja, nulmeting	punt ligt op x-as, datum: 30-06-1997
106	2 <sup>e</sup> meting aan meetpuntjes	ja	
110	aanbrengen asfalt	nee	
119	3 <sup>e</sup> meting aan meetpuntjes	ja	
186	4 <sup>e</sup> meting aan meetpuntjes	ja	
321	5 <sup>e</sup> meting aan meetpuntjes	ja	
407	6 <sup>e</sup> meting aan meetpuntjes	ja	
560	7 <sup>e</sup> meting aan meetpuntjes	ja	
699	8 <sup>e</sup> meting aan meetpuntjes	ja	
883	9 <sup>e</sup> meting aan meetpuntjes	ja	
1350	10 <sup>e</sup> meting aan meetpuntjes	ja, laatste puntje	Datum: 06-12-2000

De vervormingen en spanningen voor moot 13 zijn als volgt:



Figuur 8.16 Vervormingen moot 13



Figuur 8.17 Berekende spanningen moot 13

Ook hier fluctueren de gemeten vervormingen, bij een (berekend) constant spanningsniveau. Er is hier geen duidelijk afname in het vervormingsverloop te zien als bij de vervormingen van moot 2. Het is verder erg opvallend dat de gemeten vervormingen aan de onderste rij meetpuntjes kleiner zijn dan de aan de bovenste rij gemeten meetpunten. Dit is opmerkelijk vanwege het feit dat de spanningen onder in de moot hoger zijn dan bovenin. Hierdoor zouden de vervormingen onderin groter moeten zijn. In het spanningsfiguur is echter te zien dat de spanningen vlak na meten onderin sterk afnemen, terwijl ze bovenin enigszins toenemen. Dit is dan ook terug te vinden in de berekende vervormingen. De berekende vervormingen reageren sterker op deze afname in spanning dan de gemeten vervormingen. De gemeten vervorming bovenin heeft tussen de 100 en 200 dagen ouderdom een onverklaarbare afname in verkorting, terwijl het (berekende) spanningsniveau constant is. In de spanningsfiguur voor deze moot is duidelijk te zien wanneer de laatste paar moten zijn gestort en voorgespannen. Iets dat in de spanningsfiguur van moot 2 ook aanwezig is, echter daar is het nauwelijks te zien door de schaalverdeling. In het bovenstaande figuur is verder te zien wanneer continuïteitsvoerspanning en wanneer asfalt is aangebracht. De gemeten en berekende vervormingen komen redelijk overeen. De afwijking bij de meetpuntjes boven is groter, hier is de opmerkelijke afname in de vervorming de oorzaak van. Helaas is deze afname niet verklaarbaar.



## 8.5.3 Moot 15

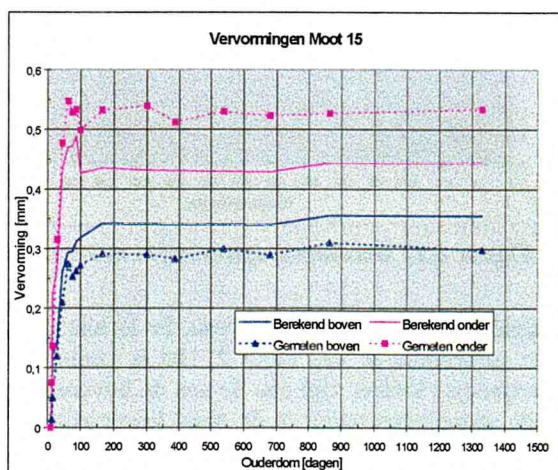
Als laatste moot 15, in deze moot zijn zoals bekend ook twee rijen meetpuntjes aanwezig.

De gebeurtenissen voor moot 15 zijn:

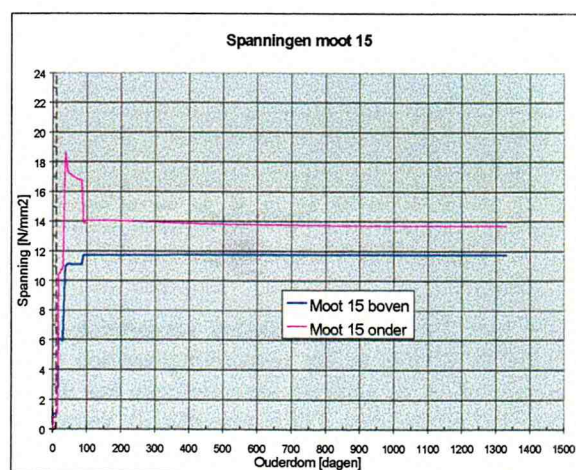
Dag	Gebeurtenis	Punt in grafiek	Opmerking
0	Storten moot 15	ja, oorsprong	Datum: 16-04-1997
9	1 <sup>e</sup> meting aan meetpuntjes	ja, nulmeting	punt ligt op x-as
12	Storten sluitmoot (midden)	nee	
13	2 <sup>e</sup> meting aan meetpuntjes	ja	
15	1 <sup>e</sup> deel continuïteitsvoersp. (60%)	nee	
16	3 <sup>e</sup> meting aan meetpuntjes	ja	
29	4 <sup>e</sup> meting aan meetpuntjes	ja	
36	Continuïteitsvoerspanning 100 %	nee	
44	5 <sup>e</sup> meting aan meetpuntjes	ja	
62	6 <sup>e</sup> meting aan meetpuntjes	ja	1 <sup>e</sup> piek
75	7 <sup>e</sup> meting aan meetpuntjes	ja	Datum: 30-06-1997
86	8 <sup>e</sup> meting aan meetpuntjes	ja	2 <sup>e</sup> piek (verv. onder)
90	aanbrengen asfalt	nee	
99	9 <sup>e</sup> meting aan meetpuntjes	ja	
166	10 <sup>e</sup> meting aan meetpuntjes	ja	
301	11 <sup>e</sup> meting aan meetpuntjes	ja	
387	12 <sup>e</sup> meting aan meetpuntjes	ja	
540	13 <sup>e</sup> meting aan meetpuntjes	ja	
679	14 <sup>e</sup> meting aan meetpuntjes	ja	
863	15 <sup>e</sup> meting aan meetpuntjes	ja	
1330	16 <sup>e</sup> meting aan meetpuntjes	ja, laatste puntje	Datum: 06-12-2000

Vanwege het feit dat de meetpuntjes 9 dagen na het storten van de moot zijn aangebracht, kunnen goed de gevolgen van de verdere bouw van de brug in kaart worden gebracht. In de figuren zijn dan ook de vervormingen ten gevolge van het storten van de sluitmoot en het aanbrengen van de continuïteitsvoerspanning en het asfalt te zien.

De vervormingen en spanningen zijn:



Figuur 8.18 Vervormingen moot 15



Figuur 8.19 Berekende spanningen moot 15

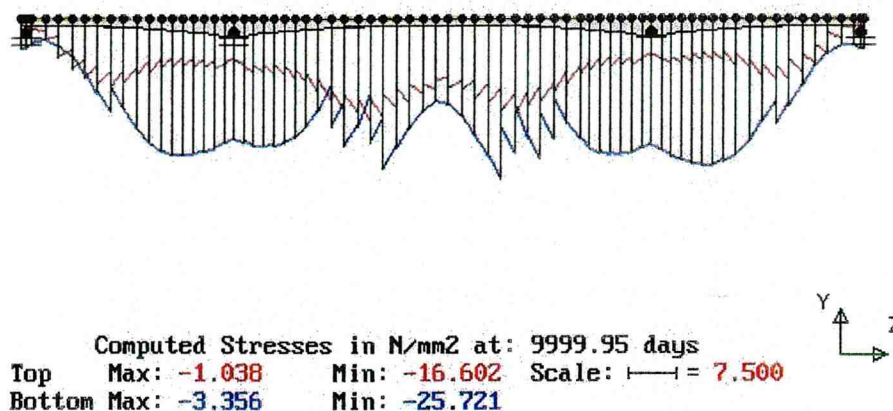
Ook hier zijn de sprongen bij de gemeten vervormingen terug te vinden, hetzij in mindere mate. Het is duidelijk dat zowel de gemeten als de berekende vervormingen redelijk goed overeenkomen.

Een oorzaak van de afwijkingen kan onder andere de toegepaste tuning van de Model Code 1990 zijn. Herhaald wordt dat de tuning in principe alleen geldig is voor die situaties waarbij er een constante spanning aanwezig is en aanwezig blijft.

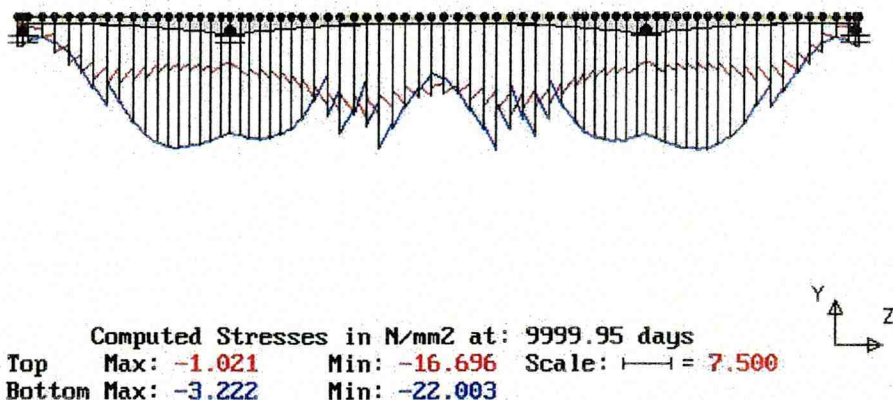


Met deze niet geheel juiste toepassing van de kruipformuleringen kan in Bridges ook een overzicht weergegeven worden van het totale spanningsverloop in de brug. Dit is te zien in het onderstaande figuur. Het spanningsverloop is bij benadering weergegeven op  $t=\infty$  (10.000 dagen). De spanningen die weergegeven zijn in figuur 8.20 zijn dus berekend met het invoerfile en het materialen-bestand, welke ook zijn gebruikt in de rest van deze paragraaf. In figuur 8.21 is het spanningsverloop nogmaals weergegeven, maar nu is de brug berekend volgens de ontwerp-berekening. In deze ontwerp-berekening zijn de data niet aangepast aan de werkelijke bouwdata. Verder is het materialen-file B85Min gebruikt, zie voor verdere toelichting hiervan eerder dit hoofdstuk.

In de figuren is goed te zien op welke plaatsen de continuïteitsvoorspanning is aangebracht. Dit is te zien aan de sprongen in het spanningsverloop in het midden van de overspanning.



Figuur 8.20 Spanningsverloop bij praktijkwaarden



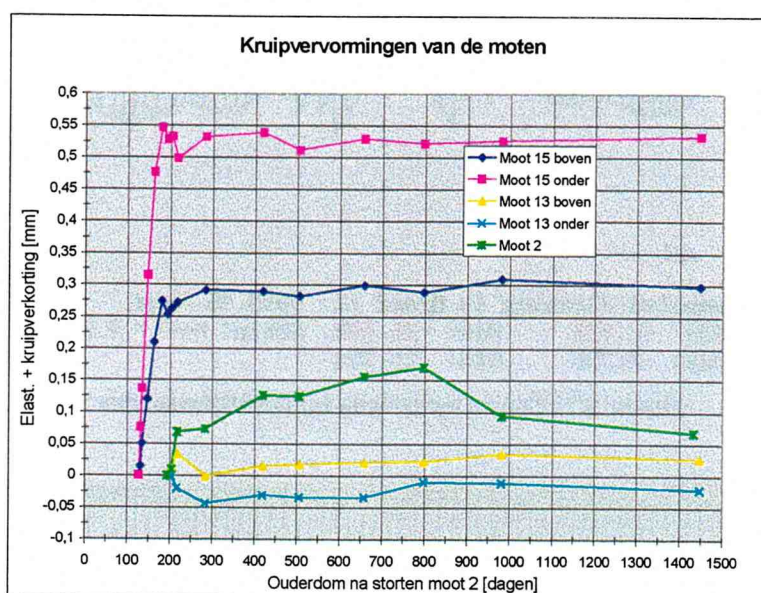
Figuur 8.21 Spanningsverloop volgens de ontwerpberekening

Indien de twee figuren worden vergeleken valt meteen op dat de berekende spanningen niet veel van elkaar verschillen. Ter plaatse van de sluitmoot zijn de spanningen onderin wat hoger dan bij de ontwerp-berekening. Ook de maximum spanning verschilt niet veel. In de brug is overall ongeveer  $10 \text{ N/mm}^2$  druk aanwezig. Dit is gedaan om ervoor te zorgen dat wanneer de brug belast wordt deze drukspanning niet omslaat naar trek. Wanneer er vanuit wordt gegaan dat de brug volledig vol staat met belasting (auto's) en er een bepaalde temperatuursgradiënt aanwezig is, zal dit tot ongeveer  $10 \text{ N/mm}^2$  trek leiden. Beide gesommeerd zal dit er dus toe leiden dat de uiterste vezel ongeveer spanningsloos is. Vandaar dat dan ook gezorgd wordt bij de bouw van een dergelijke brug, dat na verloop van jaren nog altijd een voldoende hoge drukspanning aanwezig is.



#### 8.5.4 Berekenen vervorming moten

In de vervormingsgrafieken van de drie moten is bij alledrie een andere schaalverdeling toegepast. Hieronder zijn de gemeten vervormingen van de drie moten nogmaals weergegeven, echter nu met een uniforme tijd-as. In de grafieken die hiervoor weergegeven zijn, is de oorsprong de datum van het storten van de moot. In de onderstaande grafiek is de oorsprong het tijdstip van storten van moot 2. Moot 13 is 98 dagen later gestort dan moot 2, en moot 15 is 118 dagen later gestort. Zoals al eerder gezegd is er echter pas 193 dagen na storten aan moot 2 gemeten, en 95 dagen na storten is voor het eerst aan moot 13 gemeten. Het storttijdstip voor deze moot is, als dit tijdstip wordt gerelateerd aan het storttijdstip van moot 2: 98 dagen. Aan moot 15 is (al) 9 dagen na storten voor het eerst gemeten, het storttijdstip is dan in onderstaande figuur: 118 dagen. In onderstaande grafiek is ook de y-as uniform weergegeven voor de vervorming van elke moot.

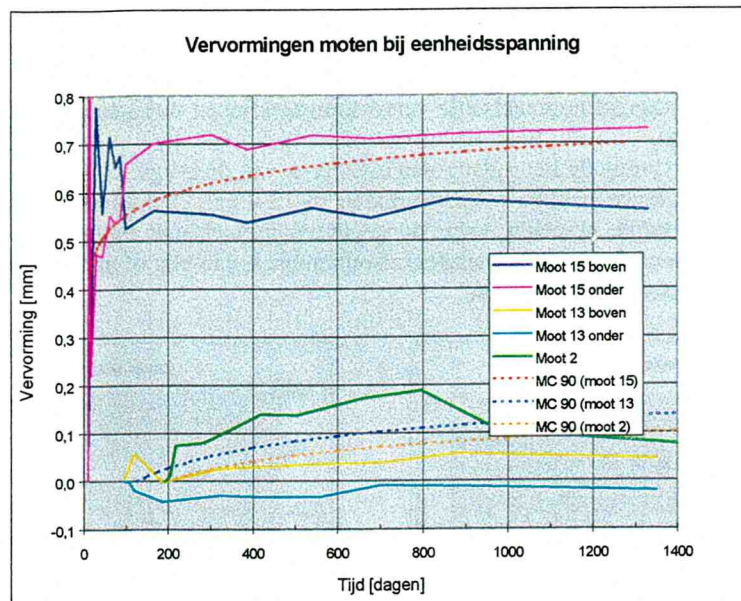


Figuur 8.22 Vervormingen van de drie moten gerelateerd aan het storttijdstip van moot 2.

Bij alle vijf vervormingslijnen horen andere spanningen. Wanneer de vervormingen gedeeld worden door de berekende spanningen die optreden, kunnen de lijnen beter vergeleken worden. In de figuur op de volgende pagina zijn de spanningen nogmaals weergegeven, maar nu met een eenheidsspanning van 20 N/mm<sup>2</sup>. Bij deze spanning zijn ook volgens de Model Code 1990 kruipvervormingen berekend.

De berekeningen zijn uitgevoerd met behulp van de spreadsheet voor twee tijdstippen van belastingen. Het ene tijdstip is 14 dagen na storten, het andere 56 dagen. Het belastingtijdstip van 14 dagen is gekozen voor moot 13 en moot 15. Voor moot 2 is het belastingtijdstip van 56 dagen aangehouden. Kijkend naar de spanningsfiguren eerder in deze paragraaf blijken dit redelijke aannames. Voor moot 15 zijn de berekende vervormingen vanaf het belastingtijdstip weergegeven. Voor moot 2 is dit gedaan voor het tijdstip vanaf het tijdstip waarbij de metingen hebben plaatsgevonden. Hiertoe zijn de berekende vervormingen vanaf tijdstip 200 dagen en ouder, verminderd met de berekende vervorming op tijdstip 200 dagen. Voor moot 13 is hetzelfde gebeurd, maar dan op tijdstip 125 dagen.





**Figuur 8.23 Gemeten en berekende kruipvervormingen van de moten**

De tijd-as is hier afwijkend ten opzichte van de vorige figuur. De datum van de eerste meting, is hier weergegeven als beginpunt van de grafieklijnen.

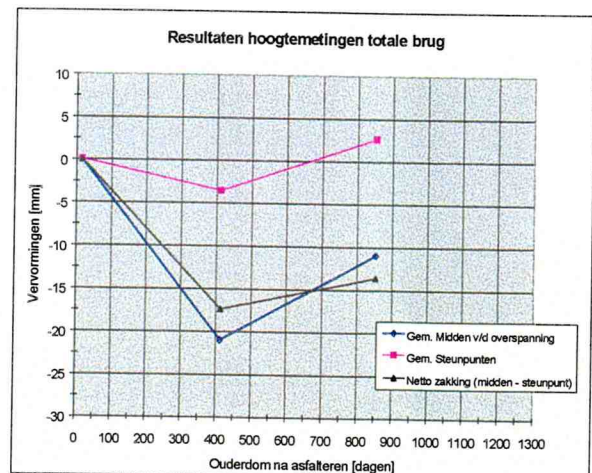
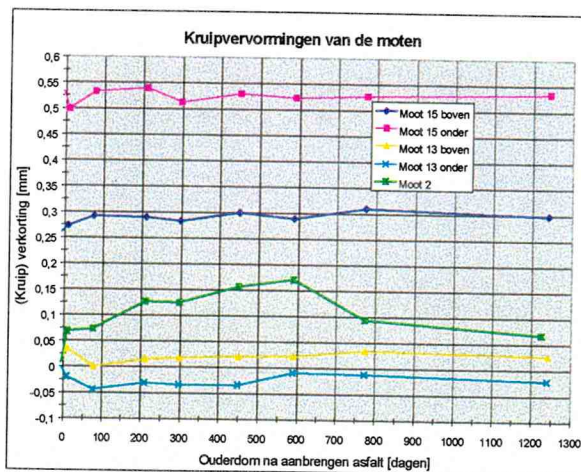
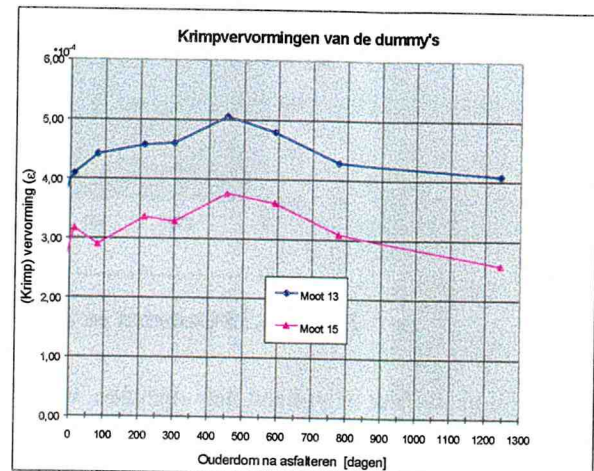
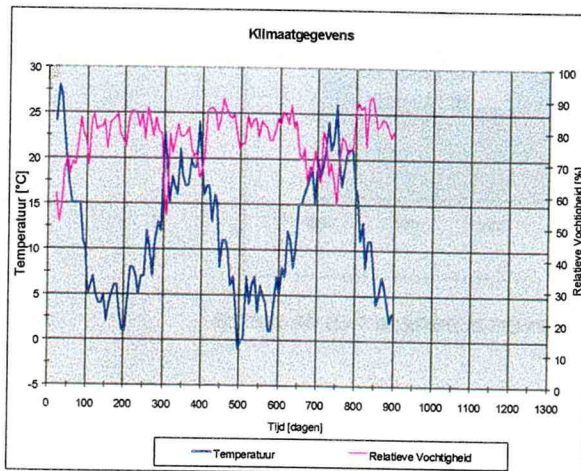
Kijkend naar de berekende en gemeten vervormingen, kan geconcludeerd worden dat de Model Code 1990 tot goede resultaten leidt. Bij deze berekening is gerekend met een constant spanningsniveau en een fictieve dikte die voor elke moot afwijkt. De fictieve dikte van elke moot is terug te vinden in paragraaf 8.2.



### 8.5.5 De vervormingen nader beschouwd

Ter informatie zijn in deze paragraaf nogmaals alle vervormingsgrafieken weergegeven van de 2<sup>e</sup> Stichtse Brug, samen met de klimaatgegevens.

Alle grafieken hebben als oorsprong de het tijdstip van asfalteren van de brug (15-7-'97). Het tijdstip 1243 is de datum waarop de laatste metingen hebben plaatsgevonden (6-12-2000). De klimaatgegevens zijn bekend tot begin 2000. Er wordt nog continu gemeten, maar de gegevens kunnen niet uitgelezen worden. De gegevens worden via een telefoonlijn doorgestuurd. Het telefoonabonnement is om een of andere reden gestopt, waardoor de gegevens niet meer uitgelezen kunnen worden.





## 8.6 Gevoeligheidsanalyse

In deze paragraaf zal de 2<sup>e</sup> Stichtse Brug nog enkele malen worden doorgerekend. Door een aantal uitgangspunten te wijzigen bij elke berekening, wordt gepoogd een overzicht te krijgen van de gevoeligheid. De gevoeligheidsanalyse zal uitgevoerd worden het al dan niet toepassen van onderstaande punten.

- De krimp uitschakelen.
- De kruip uitschakelen.
- Het effect van belastingvariaties.
- Een amplitude op de temperatuur toepassen, om seizoensinvloeden te simuleren.
- Een amplitude op de relatieve vochtigheid toepassen.
- Het effect van verschil in steunpuntszakkingen onderzoeken.
- Het effect van vermindering van de voorspanverliezen.
- De resultaten het onderzoek van Han toepassen. Han is een onderzoeker die gepromoveerd is aan de TU Delft op het tijdsafhankelijke gedrag van hogesterkte beton. Han heeft een aanpassing op de Model Code 1990 voorgesteld voor B85.

Als referentie zal het invoerfile gebruikt worden dat ook toegepast is voor de ontwerp-berekening. Het materialen-bestand MC90\* zal hierbij ook gebruikt worden. De toepassing van beide files leidde eerder dit hoofdstuk tot de MC90\*-vervormingslijn in figuur 8.7.

- De gevoeligheid, van het vervormingsgedrag van de brug, bij het al dan niet toepassen van **krimp**, is eenvoudig te onderzoeken door in het materialen-file van Bridges de krimpcoëfficiënt op nul te zetten.
- Om een gevoeligheidsanalyse uit te voeren, waarbij al dan niet **kruip** vervorming wordt meegenomen is moeilijker. Er kan al gauw de gedachtenfout worden gemaakt dat het op nul zetten van de basiskruipcoëfficiënt (in het materialen-file van Bridges) zal leiden tot de gewenste resultaten. Bridges rekent volgens de Model Code 1978 waarbij de totale kruip bestaat uit een aantal onderdelen. Zie hiervoor dan ook Hoofdstuk 5.3. Indien in het materialen-file de basiskruipcoëfficiënt op nul wordt gezet, zal er toch kruipvervorming optreden. Deze kruipvervorming zal dan nog bestaan uit vertraagd elastische vervorming en omkeerbare kruip. Zie ook figuur 5.5. Vandaar dat er geen gevoeligheidsanalyse zal plaatsvinden met het al dan niet meenemen van kruipvervorming.
- De gevoeligheid van het vervormingsgedrag zal onderzocht worden bij het aanbrengen van 10% hogere of lagere permanente belasting. Hieronder worden het asfalt en de schampkanten verstaan.
- Een **amplitude** voor de **temperatuur** kan binnen Bridges eenvoudig worden toegepast. Er hoeft alleen maar op worden gegeven met welke amplitude gerekend wenst te worden en op welk tijdstip deze amplitude haar maximum bereikt (midden zomer). Voor de **relatieve vochtigheid** geldt in principe hetzelfde. Er wordt echter geen onderzoek gedaan met een amplitude voor de relatieve vochtigheid. Zoals te zien is geweest in onder andere figuur 7.1 blijkt dat er niet of nauwelijks een duidelijke amplitude toepasbaar is. Door er toch één toe te passen wordt alleen maar de indruk gewekt dat er nauwkeuriger wordt gerekend, terwijl dit eigenlijk dus niet het geval is. De variatie van de temperatuur zal er een zijn waarbij in de zomer een temperatuursverhoging van 10°C optreedt ten opzichte van de normaal (10,4°C). In de winter een verlaging van 10°C. Alle andere berekeningen in dit afstudeerrapport zijn uitgevoerd met een temperatuur van 10,4°C die het hele jaar constant gehouden is. De amplitude wordt conform de bouwdata aangebracht. Wanneer het tijdens de bouw (hartje) winter was, zal in de berekening een gemiddelde temperatuur van 0°C aanwezig zijn.
- In figuur 8.6 is te zien geweest dat de steunpunten van de brug zo goed als gelijkmatig zakken. In Bridges kunnen ook **steunpuntszettingen** op een bepaald tijdstip worden ingevoerd. Door dit te doen kan onderzocht worden of de aanname die in het begin van dit hoofdstuk is gebruikt, juist is. De aanname betrof dat het geringe verschil van de steunpuntszettingen nauwelijks tot geen invloed zou hebben op het vervormingsgedrag van de brug ter plaatse van het midden van de hoofdoverspanning. Om dit na te gaan zullen de riviersteunpunten (de hamerstukken) een zakking meekrijgen van 5mm, terwijl de landhoofden niet zullen zakken. Gekozen wordt om dit te doen vlak na het asfalteren van de brug. De constructie is op dat moment nog relatief jong.



- Voor de bepaling van het effect van de **voorspanverliezen**, zullen in de invoer de waarden voor de wrijvingscoëfficiënt en de wobblefactor worden aangepast. Bij de ontwerp-berekening zijn conservatieve waarden aangepast. In deze gevoeligheidsanalyse zullen waarden worden toegepast die gelden volgens de ROBK. De gemiddelde waarden volgens de Richtlijnen voor het Ontwerpen van Betonnen Kunstwerken van de Bouwdienst Rijkswaterstaat zullen als uitgangspunt worden gekozen. De in de ontwerp-berekening toegepaste waarden en de waarden volgens de ROBK zijn:

	Ontwerp-berekening	ROBK
Wrijvingscoëfficiënt	0,25	0,18
Wobble-factor	0,010	0,006

- Om te bekijken wat de gevolgen zijn door met de aangepaste formulering van de Model Code 1990 volgens **Han** te rekenen, moet de gehele formulering van de Model Code 1990 aangepast worden. Omdat dit erg veel werk is, en het weinig zinvol is om de aangepaste formulering in dit afstudeerwerk te presenteren, zullen hier alleen de resultaten te zien zijn. De krimp- en kruipcoëfficiënten volgens Han zullen ook weer in een materialen-file gestopt moeten worden. Deze zal wederom getuned worden, vanwege het feit dat Bridges hoe dan ook volgens de Model Code 1978 rekent. In het navolgende overzicht is te zien welke uitgangspunten zijn gebruikt om te kunnen rekenen met Han, en tot welke basiskrimp- en kruipcoëfficiënt dit leidt.

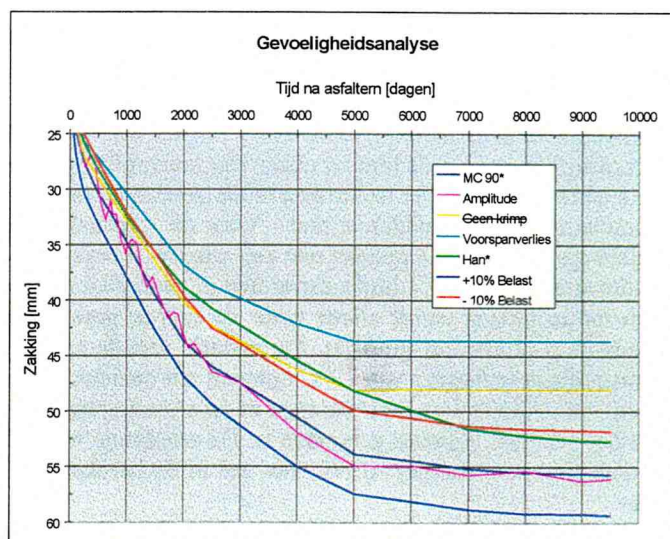
- Relatieve vochtigheid: 75 %.
- Temperatuur: 10 °C.
- Fictieve dikte: 400 mm.
- Tijdstip van belasten: 56 dagen na storten.
- Tijdstip van ontkisten: 3 dagen na storten.

Bij deze uitgangspunten komen de Model Code 1990 en Han tot het volgende:

	MC 90	Han
Kruipcoëfficiënt	100 %	53 %
Krimpcoëfficiënt	100%	240 %

Na uitvoering van de diverse berekeningen, wordt tot de volgende resultaten gekomen, waarbij de vervormingen in één figuur weergegeven worden. Het betreft de vervormingen ter plaatse van het midden van de hoofdoverspanning na asfalteren. Indien nu de Model Code 1990 als uitgangspunt wordt gekozen, kan worden weergegeven wat de afwijking is bij  $t = 10.000$  dagen

MC90*	100 %
Amplitude voor temperatuur	~100 %
Geen krimpvervorming	86 %
+/- 10 % belasting	+/- 7%
Aanpassing voorspanverliezen	78 %
Aanpassing volgens Han (Han*)	95 %



**Figuur 8.24 Resultaten gevoeligheidsanalyse**

De sprongen die de vervormingslijn vertoont, waarin gevarieerd is met de **amplitude** van de temperatuur, zijn logischerwijs te verklaren door de grote tijdstappen waarmee de berekening is uitgevoerd. Geconcludeerd kan worden dat toepassing van een amplitude op de temperatuur, niet leidt tot een toename van de vervormingen op  $t = 10.000$  dagen. Indien onderzoek wordt uitgevoerd op een kortere termijn. De toepassing van de amplitude lijkt dan te leiden tot nauwkeurigere resultaten, men berekent immers meer waarheidsgetrouw. Men moet bij toepassing van een dergelijke amplitude in de ontwerp-berekening goed weten wanneer met de bouw begonnen wordt en wanneer deze gereed is. De invloed op jong beton is namelijk groot. Een afwijking van de ontwerp-berekening kan relatief een grote invloed hebben, vandaar dat het dan ook niet verstandig is, om een dergelijke amplitude in de ontwerp-berekening mee te nemen.



Bij het berekenen met kleinere **voorspanverliezen** leidt dit vanzelfsprekend tot kleinere vervormingen. Door kleinere voorspanverliezen blijft er namelijk meer voorspankracht over, waardoor de brug minder zal vervormen. Door het uitschakelen van **krimp** vervormingen vervormt de brug ook minder. Dit is te verwachten. Andere afstudeerders hebben geconcludeerd dat de invloed van krimp klein is, de krimpvervorming zou een invloed hebben van 5 tot 10 % op het totale vervormingsgedrag. Zie hiervoor ook de *Voorstudie*. Hier blijkt echter dat de krimp een iets grotere invloed heeft, namelijk 14 %. Het kan zo zijn dat Bridges op een andere manier rekent dan de programma's waarmee de andere afstudeerders hebben gerekend. Men kan zich namelijk voorstellen dat wanneer de constructie krimpt, er meer voorspankracht in de constructie zal zijn, dan wanneer de constructie niet krimpt. Bridges houdt hier waarschijnlijk rekening mee.

Bij de variatie van de belastingen met + of - 10% belasting, leidt dit tot een vervorming die 7% hoger of lager is dan het uitgangspunt. Het blijkt wel dat het belangrijk is om de permanente belastingen zo correct mogelijk mee te nemen in de ontwerp-berekening.

Bij toepassing van de formuleren volgens **Han**, leidt dit tot kleinere vervormingen. Met dit in het achterhoofd kijkend naar de tabel op de vorige pagina, kan wederom geconcludeerd worden dat kruip verreweg de grootste invloed heeft op het vervormingsgedrag, iets wat ook wel blijkt wanneer er zonder krimpvervorming een vervormingsberekening wordt uitgevoerd. De invloed van de krimp wordt op deze manier zwaar overschat. Voor bijvoorbeeld de continuïteitsvoorspanning wordt door Bridges te veel verlies in rekening gebracht. De '240 %' bestaat voor een zeer groot deel uit verhardingskrimp. Deze is op moment van spannen al vrijwel geheel opgetreden.

In een ontwerp-berekening is het natuurlijk moeilijk om rekening te houden met verschillen in **steunpuntszettingen**. Het is wel belangrijk om de invloed van eventuele steunpuntszettingen te weten. Uitgangspunt is de ontwerpberekening met het materialen-bestand volgens de MC90\*. Indien de rivierpijlers een zakking meekrijgen van 5mm, (terwijl de landhoofden niet zakken) resulteert dit in een extra doorbuiging ter plaatse van het midden van de hoofdoverspanning van 7,5 mm. Deze extra 7,5 mm is gerelateerd aan de uitgangssituatie zonder steunpuntszakkingen. Het midden van de hoofdoverspanning buigt ten opzicht van de riviersteunpunten 2,5 mm extra door.

## 8.7 Conclusies

In dit hoofdstuk zijn gemeten vervormingen aan de 2<sup>e</sup> Stichtse Brug vergeleken met berekende vervormingen. Er zijn vervormingen op diverse plaatsen aan de brug gemeten in het kader van het monitoren van de brug. Het is de eerste uitbouwbrug in Nederland gebouwd in hogesterkte beton.

Er zijn vervormingen gemeten en berekend gedurende de gebruiksfase van de brug. Dit is het tijdstip na asfalteren van de brug. Vanaf dit tijdstip zijn hoogtemetingen verricht.

Verder zijn vervormingen tijdens de bouwfase berekend en gemeten, dit is gedaan aan de hand van de zogenaamde kerstboom. Ook zijn er in de brug in verschillende moten meetpunten aanwezig. Hiermee kunnen rekken en dus ook vervormingen van diverse moten bepaald worden.

Bij het vergelijken van de berekende en gemeten zakkingen van de brug na asfalteren bleek het volgende:

- De gemeten zakkingen zijn goed te voorspellen, mits er een goede kruipkromme aanwezig is. De kruipkromme die tot de beste voorspellingen leidde, is een kromme die tijdens laboratorium-onderzoek bepaald is.
- Andere zaken naast een juiste kruipkromme bleken een kleine invloed te hebben. Deze andere zaken zijn onder andere een aangepaste E-modulus en sterkte-ontwikkeling. Verder had ook het aanpassen van de bouwdata weinig invloed. De invloed die er aanwezig is, heeft met name invloed op de jongere beton. Na verloop van jaren (van ongeveer 10 tot 30 jaar) wordt het verschil tenietgedaan.
- De Model Code 1990 (\*) komt relatief gezien tot een redelijk goede voorspelling.
- De Model Code 1978 leidt tot een zeer grote overschatting van de vervormingen. Dit was al te verwachten gezien de voorspellingen in Hoofdstuk 4. De Model Code 1978 blijkt niet geschikt te zijn voor het voorspellen van het vervormingsgedrag van hogesterkte beton.
- In Hoofdstuk 5 is al gemeld dat bij de ontwerp-berekening van de brug gebruik is gemaakt van onjuiste waarden van de basiskrimp- en -kruipfactoren. De gebruikte factoren zijn bedoeld geweest om de Model Code 1990 te benaderen. In hoofdstuk 5 werd al voorspeld dat dit niet tot de verwachte resultaten zou leiden. En dat de resultaten tussen de Model Code 1978 en 1990 in zouden liggen. Dit blijkt aan de hand van de in dit hoofdstuk gemaakte berekeningen te kloppen.

Het vergelijken van de berekende en gemeten zakkingen tijdens de bouwfase is niet zeer succesvol geweest. De getuned Model Code 1990 blijkt tijdens de bouwfase niet tot juiste resultaten te leiden. Dit is al voorspeld in hoofdstuk 5 waar de tuning heeft plaatsgevonden. Bridges rekent immers standaard volgens de MC 78. Via een 'truc' bestaat de mogelijkheid om toch ongeveer volgens de MC 90 te rekenen. Deze truc, waarbij de Model Code 1978 getuned wordt op de Model Code 1990, gaat alleen op voor die situaties waarbij er een constant spanningsniveau aanwezig is. Tijdens de bouw van de brug, wisselt het spanningsniveau een groot aantal malen. De Model Code 1978 berekent de kruipvervorming aan de hand van een sommering van vertraagd elastische vervorming, omkeerbare en onomkeerbare kruip. Bij een vermindering in spanning kan het zo zijn dat de vertraagd elastische vervorming en de onomkeerbare kruip nog doorwerken terwijl er al weer een spanningsverhoging is aangebracht. Door deze effecten, is het niet mogelijk de Model Code 1990 zodanig te tunen dat er correcte waarden worden berekend.

Bij het vergelijken van de berekende en gemeten vervormingen bij de meetpuntjes in de drie moten wordt er wel tot redelijk correcte waarden gekomen. Het feit is wel dat de berekende vervormingen lager blijken dan de gemeten waarden. Dit zal deels aan de tuning te wijten zijn. Voorafgaand aan het tijdstip waarop metingen zijn uitgevoerd, hebben er grote spanningsveranderingen plaats gevonden. De eerste metingen zijn van vlak voor asfalteren. Hier voorafgaand zijn er met een cyclus van een week moten gestort en voorgespannen. Verder is er na het storten van de sluitmoot de continuïteitsvoorspanning aangebracht. Deze gebeurtenissen hebben een uitwerking in de kruipformulering.

Een andere oorzaak is het feit dat de metingen aan de meetpuntjes te kennen geven dat er vervormingen optreden nadat de brug gesloten en geasfalteerd is. Bij een gelijkblijvend (berekend) spanningsverloop is het onwaarschijnlijk dat er nog grote vervormingen op zullen treden. Deze blijken in de praktijk wel gemeten te zijn. Hierdoor is het gemeten vervormingsverloop anders dan de berekende. Een oorzaak voor de vervormingsveranderingen na asfalteren is moeilijk te geven.

Ook voor de swelling van de dummy's is moeilijk een verklaring te vinden. De swelling zet nu al ruim 2 jaar door. Een duidelijke oorzaak is hiervoor niet te geven.



In dit hoofdstuk is tenslotte nog een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. De resultaten hiervan zijn hieronder kort weergegeven. Zoals hiervoor al vermeld blijkt dat het aanpassen van de kruipkromme op gemeten waarden in het laboratorium leidt tot zeer goede voorspellingen. Deze aanpassing van de kruipkromme is in paragraaf 8.2 beschreven. Uitgangspunt hierbij is figuur 7.11 geweest. Hierin is de gemeten kruipvervorming weergegeven, zoals deze is gemeten in het laboratorium en is deze vergeleken met voorspellingen van de voorschriften. Indien niet van de Model Code 1990 wordt uitgegaan, maar van de lab.meting, wordt de kruipvervorming verlaagd met ongeveer 30 % (zie figuur 7.11). Indien dit wordt gedaan leidt dit tot een afname in vervorming van ongeveer 50% (!). Zie voor deze afname figuur 8.8. Nu moet wel gezegd worden, dat hierbij ook wel een aanpassing heeft plaatsgevonden in de ontwikkeling van de E-modulus en in de ontwikkeling van de druksterkte. Deze aanpassingen zijn echter zeer klein geweest. Er blijkt dus wederom dat het zeer belangrijk is dat er een zo juist mogelijke kruip in de berekening wordt meegenomen.

De gevoeligheidsanalyse leverde nog de volgende resultaten op:

- Indien er een amplitude wordt meegenomen voor de temperatuur, leidt dit op  $t=10.000$  dagen niet tot een toename van vervormingen. Er is gerekend met een amplitude van  $10^{\circ}\text{C}$ . Er is geen amplitude voor de relatieve vochtigheid toegepast, vanwege het feit dat deze niet duidelijk naar voren kwam uit de resultaten van de monitoringsgegevens (figuur 7.1).
- Indien er wordt gerekend zonder krimpvervorming, zal dit ervoor zorgen dat de vervormingen in het midden van de hoofdoverspanning afnemen met 14 %. Zoals eerder al vermeld blijkt dat krimpvervorming een relatief kleine invloed heeft op de totale vervorming. De vermindering in vervorming door het weglaten van krimp, is waarschijnlijk grotendeels toe te schrijven aan grotere voorspankrachten die hierdoor optreden. Indien gekeken wordt naar voorspelde waarden uit de voorschriften en gemeten waarden volgens laboratorium-metingen om na te gaan welke beter gebruikt kunnen worden, dan kan geconcludeerd worden dat een (kleine) afwijking van de krimpvervorming nauwelijks invloed heeft op het vervormingsgedrag van de uitbouwbrug.
- Nauwkeuriger omgaan met voorspanverliezen leidt tot grotere verschillen. In het ontwerp van de 2<sup>e</sup> Stichtse Brug is zeer voorzichtig ontworpen. Er is van voorspanverliezen uitgegaan die relatief gezien aan de hoge kant zijn. Indien deze worden aangepast aan de ondergrenzen volgens de ROBK, leidt dit tot een afname van de vervormingen van ongeveer 22%.
- Onderzoeker Han heeft aanpassingen gedaan aan de Model Code 1990. Door zijn aanpassingen worden de vervormingen van de brug op  $t = 10.000$  dagen verminderd met 5%. Dit is dus zeer minimaal. Het verschil is in het begin groter, maar hoe ouder de brug, hoe kleiner deze verschillen worden. Door het toepassen van Han wordt in Bridges de invloed van krimp zwaar overschat. Voor de continuïteitsvoorspanning wordt namelijk te veel verlies in rekening gebracht.
- Indien vervolgens gevarieerd wordt met het belastingsniveau van de brug, blijkt dat wanneer de (rustende) belastingen 10% hoger of lager zijn, dit leidt tot vervormingsverschillen van ongeveer 6 à 7 % (ten opzichte van de nul-situatie). Dit is relatief gezien veel. Bij het ontwerp is het dus van belang de rustende belastingen goed in te schatten. Onder rustende belasting valt onder andere de hoeveelheid belasting door asfalteren, de schampkanten en de afspannokken.

In de gevoeligheidsanalyse is ook de invloed van steunpuntszettingen bekeken. Bij een zakking van 5 mm van de tussensteunpunten t.o.v. de landhoofden, leidt dit tot 2,5 mm extra zakking in het midden van de hoofdoverspanning t.o.v. de tussensteunpunten.





## 9 Herberekening diverse bruggen

### 9.1 Inleiding

In het vorige hoofdstuk is de 2<sup>e</sup> Stichtse Brug op diverse manieren doorgerekend en zijn gemeten resultaten vergeleken met berekende resultaten. Naast de 2<sup>e</sup> Stichtse Brug zijn er nog een groot aantal andere uitbouwbruggen in Nederland. Zoals in de *Voorstudie* is vermeld kunnen deze bruggen in drie categorieën ingedeeld worden, te weten de bruggen gebouwd met hogesterkte beton, met grindbeton en met lichtbeton. De 2<sup>e</sup> Stichtse Brug is gebouwd in hogesterkte beton. De resultaten uit het vorige hoofdstuk kunnen niet voor alle bruggen, of hogesterkte betonnen bruggen toegepast worden. Daarvoor zijn de resultaten gemeten aan één brug te weinig. Daarom zal in dit hoofdstuk gepoogd worden de resultaten van het vorige hoofdstuk uit te breiden naar een groter aantal uitbouwbruggen, om zo te kunnen komen tot uniforme conclusies en aanbevelingen. Lichtbeton bruggen zullen echter buiten beschouwing gelaten worden, vanwege het feit dat er geen bruggen meer gebouwd zullen gaan worden in lichtbeton. De ervaringen met dit materiaal zijn te negatief geweest. Onderzoek naar de hogesterkte en grindbetonnen bruggen blijven dan over. Er is echter in hogesterkte beton nog maar zeer weinig gebouwd. Te weten drie bruggen, de 2<sup>e</sup> Stichtse Brug, de brug bij Vianen en de Dintelhavenbruggen. Ten tijde van dit afstudeerwerk wordt de Oostbrug van de twee Dintelhavenbruggen nog gebouwd. De Westbrug hiervan en de brug bij Vianen zijn op hun beurt weer te jong om onderzoek naar te doen. Hoogtemetingen zijn aan deze bruggen nog niet gedaan, ze zijn alleen ingemeten (de nulmeting). De bruggen zijn ook niet zo uitgebreid gemonitord als de 2<sup>e</sup> Stichtse Brug. Welke gegevens wel bekend zijn, zijn de hoogtemetingen tijdens het uitbouwen. In het vorige hoofdstuk is echter gebleken dat met de gebruikte tuning van de Model Code 1990 niets zinvol voorspeld kan worden, met betrekking tot het vervormingsgedrag tijdens de uitbouwfase. Vandaar dat ook verder onderzoek naar hogesterkte betonnen uitbouwbruggen strandt.

De uitbouwbruggen gebouwd in grindbeton blijven dan over. Grindbeton zal misschien nog gebruikt worden in de toekomstige bouw van uitbouwbruggen. Vandaar dan ook dat in dit hoofdstuk diverse grindbeton bruggen zullen worden herberekend. De bruggen die in dit hoofdstuk zullen worden herberekend, zullen bruggen zijn waarvan al een computerinvoer bestaat. Vele bruggen zijn berekend met de voorloper van Bridges, het programma Bouw. Zoals al eerder is vermeld, is de invoer van Bouw relatief eenvoudig om te zetten naar een invoerfile voor Bridges. Veel invoer is in de loop der jaren verloren gegaan. Er is nog maar van een klein aantal uitbouwbruggen computer invoer bekend. Hetzij digitaal, hetzij op papier uitgedraaide invoer.

Er is Bouw-invoer teruggevonden voor de volgende bruggen:

- De brug bij Empel;
- De brug bij Grubbenvorst;
- De brug bij Ravenstein;
- De brug bij Rheden;
- De Zeeburgerbrug.

Zoals gezegd zullen alleen de bruggen onderzocht worden waarvan invoer bekend is. Het zou ook mogelijk zijn om van tekening af een invoerfile te creëren. Echter stuit met hierbij op veel problemen. Het eerste probleem is vanzelfsprekend de tijd. Het is in het kader van dit afstudeerwerk ondoenlijk om voor een bepaald aantal bruggen invoerfiles te gaan maken. Een volgend probleem is om de daadwerkelijke tekeningen boven water te krijgen. Een overzichtstekening opsporen lukt wel, echter tekeningen waarin precies de doorsnede vormen van de brug staan, zijn veel moeilijker te vinden. Om een invoerfile te creëren is naast deze geometrie van de brug, ook informatie nodig over de voorspanning. Het verloop van de voorspanning en welke voorspanning is aangebracht is essentieel om een goed invoerfile te maken. Vervolgens moet ook ongeveer bekend zijn wanneer welke moot is gestort, wanneer de volgende is gestort enzovoort.

Duidelijk mag zijn dat het dus ondoenlijk is om invoerfiles te creëren van bruggen waarvan deze files ontbreken. Vandaar dat in dit hoofdstuk alleen de hierboven genoemde bruggen zullen worden beschouwd.

De Zeeburgerbrug zal echter niet beschouwd worden. Zoals terug te vinden in de *Voorstudie*, zakt steunpunt 1 (het landhoofd) van deze brug onevenredig veel ten opzichte van de rest van de brug. Door deze zakking is het niet mogelijk om nog betrouwbaar onderzoek naar het vervormingsgedrag van deze brug te doen.

## 9.2 Materialen-files

De materialen-files die gebruikt worden voor de berekening van het vervormingsgedrag van de grindbeton bruggen zijn hieronder gegeven. De materialen-files zijn gebaseerd op B35. Het is niet exact te achterhalen welke betonklasse er is toegepast bij de bouw van de diverse bruggen. De klassering van de betonsterkten was ten tijde van de bouw van de bruggen in dit hoofdstuk anders. Betonklasse B35 ligt hier hoogstwaarschijnlijk het dichtst bij in de buurt.

In de materialen-files is dit dan ook toegepast. Er hebben geen, als bij de 2<sup>e</sup> Stichtse brug, laboratorium metingen plaats gevonden waarmee nagegaan kan worden wat de sterkteklassen daadwerkelijk is.

De materialen-files zijn voor de Model Code 1978 en de getunedede Model Code 1990 weergegeven. De tuning van de Model Code 1990 is voor B35 op de inmiddels bekende wijze gedaan. Er wordt hier verder niet toegelicht hoe de tuning tot stand gekomen is. Zie voor verdere toelichting Hoofdstuk 5.

Material 1			
B35			
For failure analysis: 3 point diagram			
strain		stress	-21.0
-0.0035			
-0.00175			-21.0
0.0			0.0
For construction: MODEL 2			
Maturity:	2 days	Modulus :	20975    Strength: 10.8
Maturity:	3 days	Modulus :	23914    16.0
Maturity:	7 days	Modulus :	27659    24.7
Maturity:	14 days	Modulus :	29560    30.1
Maturity:	28 days	Modulus :	30897    34.4
Maturity:	100 days	Modulus :	32489    40.0
Maturity:	300 days	Modulus :	33328    43.2
Maturity:	1000 days	Modulus :	33918    45.5
Maturity:	3000 days	Modulus :	34268    46.9
Maturity:	10000 days	Modulus :	34520    48.0
Dilatancy		: 0.000010	
Dead weight		: 2500	
Cement coefficient:		1	
Humidity	Shrinkage	Creep	Coefficient fictive thickness
100	0.00010	0.8	30
90	-0.00013	1.0	5
70	-0.00032	2.0	1.5
40	-0.00052	3.0	1

Figuur 9.1 Materialen-file B35 volgens Model Code 1978

Material 1			
B35			
For failure analysis: 3 point diagram			
strain		stress	-21.0
-0.0035			
-0.00175			-21.0
0.0			0.0
For construction: MODEL 2			
Maturity:	2 days	Modulus :	21115    Strength: 18.3
Maturity:	3 days	Modulus :	23008    21.7
Maturity:	7 days	Modulus :	26251    28.3
Maturity:	14 days	Modulus :	28246    32.8
Maturity:	28 days	Modulus :	29747    36.3
Maturity:	100 days	Modulus :	31550    40.9
Maturity:	300 days	Modulus :	32444    43.2
Maturity:	1000 days	Modulus :	33010    44.7
Maturity:	3000 days	Modulus :	33303    45.5
Maturity:	10000 days	Modulus :	33485    46.0
Dilatancy		: 0.000010	
Dead weight		: 2500	
Cement coefficient:		1	
Humidity	Shrinkage	Creep	Coefficient fictive thickness
100	0.00000	0.0	30
90	-0.000116	0.440	5
70	-0.000348	1.320	1.5
40	-0.00000	0.0	1

Figuur 9.2 Materialen-file B35 volgens Model Code 1990\*



### 9.3 Resultaten herberekening

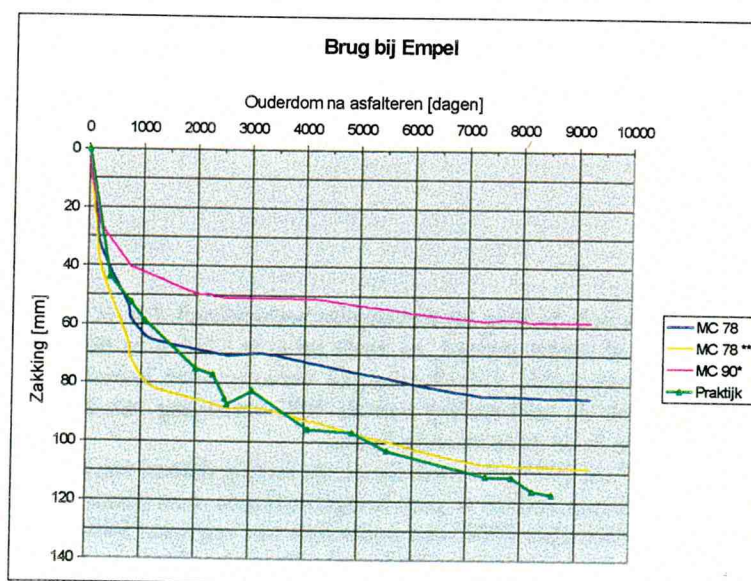
In deze paragraaf zullen de resultaten van de herberekening van de diverse bruggen worden weergegeven. Het vergelijk tussen de voorschriften en de gemeten zakkings betreft het vervormingsverloop na asfalteren. De invoerfiles die gebruikt zijn, zijn zoals gezegd afkomstig uit het programma Bouw. Over de juistheid van de invoer kan weinig gezegd worden. De files zijn hoogst waarschijnlijk gebruikt om de ontwerp-berekening van de brug mee te maken. In hoeverre de werkelijke bouw van de brug hiervan afwijkt is niet te zeggen. Kijkend naar het verschil tussen de ontwerp-berekening en de bouw van de 2<sup>e</sup> Stichtse Brug zijn er al aanzienlijke verschillen in de stortdata te zien. Welke afwijkingen bij de hier genoemde bruggen aanwezig zijn, is niet te zeggen. Dagboeken van dergelijke bruggen zijn niet te achterhalen. In dagboeken wordt vermeld wat er op welke datum tijdens de bouw gebeurd is. In deze dagboeken zou terug te vinden kunnen zijn wanneer welke moot gestort en ontkist is. Verder is zoals gezegd in de vorige paragraaf onbekend welke sterkteklasse exact is toegepast.

#### 9.3.1 Empel

Als eerste wordt de brug bij Empel opnieuw doorerekend. De resultaten van deze berekening zijn hieronder in de figuur weergegeven. De berekening met Bridges gebeurt vanzelfsprekend aan de hand van de Model Code 1978, de getunedede Model Code 1990 (MC90\*) en een aangepaste Model Code 1978 (MC78\*\*).

Bij eerder onderzoek naar het vervormingsgedrag van uitbouwbruggen, is namelijk al gebleken dat de Model Code 1978 te optimistisch presteerde. Zie hiervoor ook de *Voorstudie*. Er is toen geconcludeerd dat het verhogen van de basiskruipcoëfficiënt met 40% zou leiden tot een betere voorspelling. In het materialen-bestand van de MC78\*\* is deze verhoging toegepast. De resultaten hiervan zijn ook in de diverse figuren weergegeven. Er wordt in tegenstelling tot de vorige hoofdstukken geen gebruik gemaakt van een tuning o.i.d. De basiskruipcoëfficiënt van de Model Code 1978 wordt alleen maar verhoogd met 40%. Er is verder niet gesleuteld aan de Model Code 1990.

De brug bij Empel is van 1969 tot 1971 gebouwd, in 1971 heeft ook de eerste hoogtemeting plaatsgevonden. In 1994 is voor het laatst aan de brug gemeten. De brug heeft een hoofdoverspanning van 120,5 m.

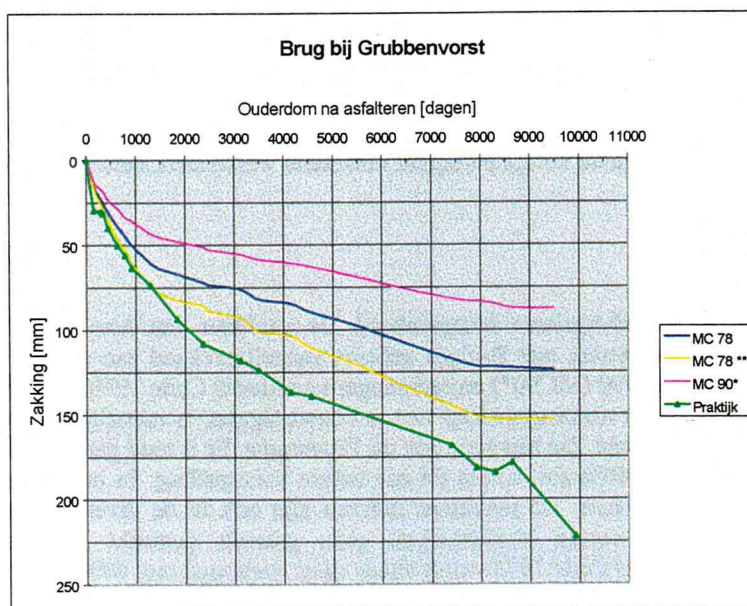


Figuur 9.3 Vervormingsberekening Brug bij Empel

Al meteen valt op dat de gemeten vervorming veel groter is dan de berekende vervormingen volgens de eigenlijke formuleringen van de Model Codes. Net als in de rest van het rapport is te zien dat de Model Code 1978 tot grotere vervormingen leidt dan de Model Code 1990. De aanpassing van de Model Code 1978 leidt tot vele betere resultaten. Vooralsnog kan geconcludeerd worden dat de Model Code 1978 voor grindbeton (B35) goed presteert. Of dit voor de andere bruggen ook het geval is zal moeten blijken.

### 9.3.2 Grubbenvorst

De volgende brug die doorgerekend wordt is de brug bij Grubbenvorst. Ook deze brug is over een lange tijd met enige regelmaat gemonitord. Deze brug is van 1968 tot 1971 gebouwd, en de nulmeting heeft ook in 1971 plaatsgevonden. De laatste meting dateert van 1998. In 1994 is de brug opnieuw geasfalteerd. Hierbij is er te veel asfalt op de brug aangebracht. Dit teveel aan asfalt is ongeveer een jaar later weer verwijderd.



Figuur 9.4 Vervormingsberekening brug bij Grubbenvorst

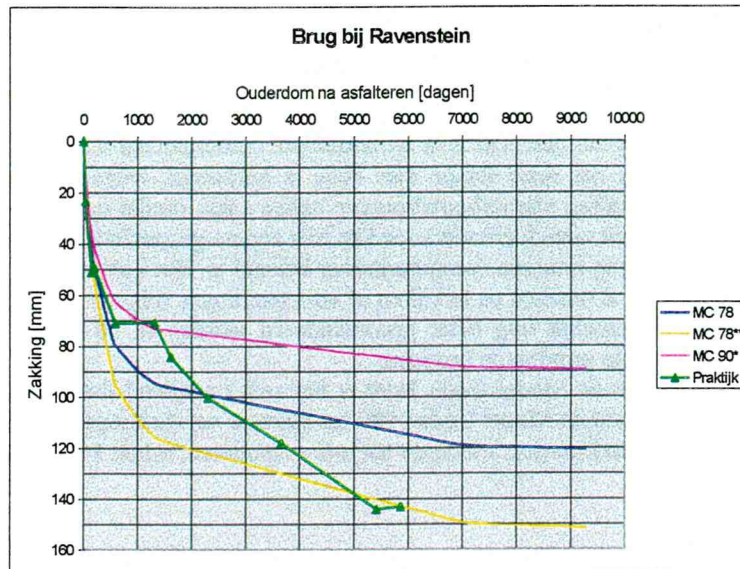
De gemeten vervormingen zijn hier wat groter dan berekend. Maar ook hier presteert de Model Code 1978 met de aanpassing van de kruipfactor het best. De grotere vervormingen door asfalteren zijn in de gemeten vervormingen goed terug te vinden.

### 9.3.3 Ravenstein

Net als Empel en Grubbenvorst, is ook de brug bij Ravenstein herberekend. Het is deze brug geweest waarmee Bouw indertijd getuned is. Zoals al eerder gezegd, en zoals terug te vinden in de *Voorstudie*, bleek Bouw te optimistisch te voorspellen. De voorspelde tijdsafhankelijke vervormingen waren minder groot dan indertijd gemeten. Bij deze brug is dan ook de aanbeveling van de 40% verhoging van de kruipcoëfficiënt tot stand gekomen. Dit is ook terug te vinden in de onderstaande figuur.

De brug bij Ravenstein is van 1972 tot 1975 gebouwd. De eerste meting dateert van april 1975. De laatste meting dateert van mei 1991. Sinds deze datum hebben er geen hoogtemetingen meer plaatsgevonden. De brug heeft ten tijde van dit afstudeeronderzoek (december 2000) een ouderdom van ongeveer 9400 dagen. Het is spijtig dat er de laatste 9 jaar niet meer aan deze brug is gemeten. De brug heeft een hoofdoverspanning van 129,4 m.





**Figuur 9.5 Vervormingsberekening brug bij Ravenstein**

Ook hier blijkt de Model Code 1978 tot betere resultaten te leiden. De verhoging van de kruipcoëfficiënt met 40% blijkt een goede aanbeveling om tot een redelijke overeenstemming te komen met de gemeten vervormingen. Het blijft echter jammer dat er de laatste jaren zo weinig aan bruggen is gemeten.

#### 9.3.4 Rheden

Zoals gezegd is er ook een invoerfile van de brug bij Rheden aanwezig. Deze brug, gebouwd in 1990, is nog relatief jong. De laatste hoogtemeting dateert van september 1993. De tijd waarover dus metingen bekend zijn, is ruim 1000 dagen. Dit is in vergelijking met de andere bruggen weinig. De brug is in tegenstelling tot de andere grindbetonbruggen ook uitgevoerd in B45.

Vanwege de korte tijd waarover gemeten is en vanwege het feit dat er wat mis schijnt te zijn met de invoerfile, is ervoor gekozen deze brug niet mee te nemen in dit onderzoek.

Bij de vorige bruggen is gebleken dat de voorschriften de vervormingen in de eerste paar 1000 dagen niet goed voorspellen. Indien dan ook conclusies zouden worden getrokken voor de brug bij Rheden met de meetdata tot 1000 dagen ouderdom, zullen dit conclusies worden met twijfelachtige achtergrond.

Een groter probleem is echter dat Bridges niet juist rekent met de invoerfile die beschikbaar is voor deze brug. De brug gaat in Bridges na verloop van tijd 'resoneren'. De verplaatsing is het ene moment positief, het andere moment negatief. Onduidelijk is hoe dit komt. De invoer zit waarschijnlijk tegen de grenzen van het programma aan, waardoor interpolaties binnen het programma het ene moment positief, het andere negatief zijn. Er is gepoogd om dit tegen te gaan om voorspanningen op een later tijdstip aan te brengen, ondersteuning op een ander tijdstip aan te brengen of te verwijderen. Dit alles had weinig effect. Vervolgens is geprobeerd dit tegen te gaan door op bepaalde plaatsen in de constructie slappe veren aan te brengen, maar ook dit had weinig effect. Indien nu stijvere veren zouden worden aangebracht, zal het vervormingsgedrag essentieel anders gaan verlopen. Door dit alles is ervoor gekozen om de brug bij Rheden niet mee te nemen binnen dit afstudeeronderzoek.

### 9.4 Conclusie

De conclusie hoeft maar kort te zijn, voor grindbetonbruggen (B35) presteert de Model Code 1978 met de aanpassing van de basiskruipfactor het best. Dit is in dit hoofdstuk duidelijk naar voren gekomen. De aanpassing van de basiskruipfactor houdt in dat deze factor met 40% is verhoogd. Deze verhoging is tijdens eerder onderzoek naar het vervormingsgedrag van uitbouwbruggen aanbevolen, omdat deze verhoging bleek te leiden tot goede voorspellingen. Binnen dit afstudeeronderzoek kan niet anders geconcludeerd worden.

Het is spijtig dat van maar zo weinig bruggen computerinvoer bekend is. Het kost immers relatief gezien weinig moeite om bruggen opnieuw door te rekenen en te kijken of voorspellingen volgens de voorschriften correct zijn. Bij meer herberekeningen kan namelijk nog beter geconcludeerd worden of de in dit hoofdstuk naar voren gekomen resultaten gelden voor alle grindbeton bruggen.

Wat betreft de voorspellingen van de Model Code 1990 is het zeer opvallend dat deze zo slecht presteert. In hoofdstuk 4 en 5 was al duidelijk dat de Model Code 1990 tot kleinere vervormingen zou leiden in vergelijking met de Model Code 1978. Voor hogesterktebeton leidde dit tot juiste resultaten, echter bij grindbeton niet.



## 10 Conclusies en aanbevelingen

In dit slothoofdstuk zullen de conclusies van het rapport worden samengevat. Verder zullen er ook aanbevelingen plaatsvinden. Deze aanbevelingen zijn een handwijzing voor de constructeurs, en zijn bedoeld als aandachtspunt tijdens het ontwerp, of het herberekenen van uitbouwbruggen.

### 10.1 Conclusies

De conclusies die hier worden besproken zijn opgesomd aan de hand de opbouw van hoofdstukken binnen dit afstudeerrapport.

- Bij het vergelijken van de diverse voorschriften (Model Code 1978, Model Code 1990 en de VBC) komt naar voren dat de MC 78 tot een grotere kruip leidt. Het vergelijk is uitgevoerd aan de hand van realistische en onderbouwde uitgangspunten. De uitgangspunten zijn bijvoorbeeld de betonkwaliteit, de relatieve vochtigheid, de temperatuur, de fictieve dikte, het tijdstip van belasten, enz. Hierbij is gebleken dat de Model Code 1978 in alle gevallen tot een grotere kruipvervorming (incl. elastische vervorming) komt. De andere twee voorschriften voorspellen de kruip ongeveer in dezelfde orde van grootte. De afwijking van de Model Code 1978 ten opzichte van de andere twee voorschriften neemt toe bij toename van de betonkwaliteit.
- Bij vergelijking van krimpvervormingen is een minder duidelijke tendens tussen de voorschriften onderling te herkennen. De afwijkingen tussen de voorschriften zijn relatief groot. De Model Code 1978 wijkt bij een hogere betonklasse wederom opmerkelijk veel af van de andere voorschriften. De krimp wordt ten opzichte van de andere voorschriften ruim overschat.  
De VBC en de Model Code 1978 bereiken na 10.000 dagen (30 jaar) een asymptoot, wat wil zeggen dat krimpvervormingen na deze ouderdom geen invloed meer hebben op het tijdsafhankelijke vervormingsgedrag. Bij de Model Code 1990 wordt zelfs na 300 jaar (!) nog geen asymptoot bereikt. Dit is zeer opvallend. Het voorschrift voorspelt blijkbaar geen eindvervorming met betrekking tot de krimp.
- In de formuleringen van de Model Code 1990 moet in principe een extra temperatuurseffect in rekening worden gebracht. Deze temperatuurscorrectie is niet hetzelfde als de standaard correctie voor temperatuur die in de fictieve ouderdom terugkomt. De temperatuurscorrectie waar het hier om gaat, dient toegepast te worden indien de gemiddelde omgevingstemperatuur afwijkt van de 20 °C. Dit is in Nederland het geval is, we hebben hier namelijk te maken met een gemiddelde temperatuur van 10,4 °C.  
De extra temperatuurscorrectie leidt met betrekking tot de krimpvervorming tot een afname van krimp van ongeveer 21 %. En tot een afname van kruipvervorming (incl. elastische vervorming) van ongeveer 7%.
- Bij aanvang van dit afstudeerwerk was duidelijk dat Bridges niet geschikt was om te rekenen volgens de Model Code 1990. In hoeverre dit mogelijk of onmogelijk was, is in de loop van dit afstudeerwerk duidelijk geworden. De MC 90 kon niet op een eenvoudige manier in het programma geïmplementeerd worden, het programma zou hiervoor herschreven moeten worden. De Model Code 1990 zal dan ook in een opvolger van Bridges wel verwerkt worden. De opvolger van Bridges zal het computerprogramma ALP++ zijn. Dit programma zal een samenvoeging worden van Bridges en Alp. Dit laatste programma is een programma wat binnen Rijkswaterstaat al gebruikt wordt. Het programma ALP++ zal medio 2001 in gebruik worden genomen en kon helaas niet gebruikt worden binnen dit afstudeeronderzoek.  
Om toch te rekenen volgens de Model Code 1990 binnen Bridges, moest er een 'truc' worden uitgehaald. Bridges rekent immers alleen volgens de Model Code 1978, en de opzet van de formuleringen is in de MC90 radicaal aangepast. Binnen Bridges bestaat er een geringe mogelijkheid om tijdsafhankelijke vervormingen aan te passen. Dit kan gebeuren binnen een zogenaamde materialen-file. In dit bestand worden de toegepaste materiaaleigenschappen beschreven. Binnen dit bestand kan men o.a. aanpassingen doen aan de ontwikkeling van de E-modulus, de ontwikkeling van de druksterkte en het aanpassen van de basiskrimp- en -kruipcoëfficiënten. De 'truc' behelst het zodanig aanpassen van deze coëfficiënten dat de krimp- en kruipkrommen volgens de Model Code 1978 ongeveer gelijk zijn aan die van de Model Code 1990. Dat dit maar ten dele lukt mag duidelijk zijn, de formuleringen zijn dan ook compleet anders. Het uitgangspunt is geweest dat de tijdsafhankelijke vervormingen op 10.000 dagen een zelfde waarde hebben. Het toepassen van een dergelijke truc blijkt tot goede resultaten te leiden.



- In aanvulling op het bovenstaande punt moet wel gemeld worden dat in principe de 'truc' alleen maar toegepast mag worden op een situatie waarbij er een constante belasting / spanning op de constructie aanwezig is. De belasting mag in de tijd niet veel variëren, er mag dus geen belasting worden bijgevoegd of worden verwijderd. Dit zorgt ervoor dat de 'truc' alleen tot goede resultaten leidt na het tijdstip van asfalteren van de brug. Tijdens het uitbouwproces zal dit leiden tot minder betrouwbare resultaten.
- In dit afstudeerrapport zijn ook bestaande onderzoeken bekeken en vergeleken met de voorschriften om na te kunnen gaan welk voorschrift in welke situatie tot de beste resultaten leidt. Er zijn verschillende onderzoeken gebruikt, te weten het monitoringonderzoek van de 2<sup>e</sup> Stichtse Brug, het monitoringonderzoek aan de Dintelhavenbrug, het monitoringonderzoek van de brug bij Vianen en een tweetal onderzoeken van de TU Delft naar betoneigenschappen van B65. Het eerst genoemde monitoringonderzoek is zeer uitgebreid, de andere twee veel minder. De rapporten bevatten o.a. metingen naar krimp- en kruipvervormingen onder verschillende omstandigheden. Een groot aantal onderzoeken zijn echter niet toepasbaar gebleken. Het uitgangspunt is immers het vergelijken van de onderzoeken naar de voorspellingen van de voorschriften. De oorzaak van de geringe toepasbaarheid is onder andere, dat verschillende metingen niet gebruikt kunnen worden doordat proefstukken (dummy's) nat zijn geworden, waardoor deze onbetrouwbare resultaten laten zien. Andere onderzoeken zijn summier wat betreft het aantal metingen. En een ander onderzoek is moeilijk toepasbaar vanwege het feit dat proefstukken onder verschillende omstandigheden zijn bewaard. De proefstukken zijn veelal bewaard onder geconditioneerde laboratorium omstandigheden. De voorschriften kunnen echter geen correcte voorspellingen doen als een proefstuk onder zeer uiteenlopende omstandigheden is bewaard. Van de metingen die wel gebruikt kunnen worden blijkt de Model Code 1990 grofweg gezien de beste voorspellingen te leveren. De Model Code 1978 blijkt voor het hogesterkte beton veel hiervan af te wijken. De VBC (in aanvulling met de CUR-aanbeveling) blijkt ook tot goede resultaten te leiden.
- Het monitoringonderzoek van de 2<sup>e</sup> Stichtse Brug bevat meer resultaten dan alleen krimp- en kruipresultaten. Er worden ook hoogtemetingen aan de brug uitgevoerd. Deze hoogtemetingen vinden plaats na het tijdstip van asfalteren van de brug, dus tijdens de gebruiksfase. Indien deze gemeten vervormingen worden vergeleken met berekende vervormingen volgens de voorschriften blijkt de Model Code 1990 wederom tot de beste resultaten te leiden. De voorspellingen volgens de Model Code 1978 zijn veel te groot. Bij de laatste hoogtemeting (november 1999) blijkt de Model Code 1990 de zakking ter plaatse van het midden van de hoofdoverspanning te overschatten met 150%. De Model Code 1978 met maar liefst ruim 400 %. De Model Code 1990 voorspelt dat de vervorming op  $t=10.000$  dagen ongeveer 55 mm zal zijn, de MC 78 voorspeld dat dit 155 mm zal zijn. Bij de ontwerp-berekening is men van ongeveer 120 mm. uitgegaan.
- De berekening is nog enkele malen uitgevoerd waarbij aanpassingen zijn gedaan aan de materiaalgegevens. Indien nu de in het laboratorium gemeten waarden worden toegepast, blijkt dit tot zeer goede resultaten te leiden. De aanpassingen betreffen de aanpassing van de kruipkromme, de ontwikkeling van de E-modulus en de druksterkte. Deze laatste twee zijn aangepast aan de hand van gemeten waarden in het monitoringrapport. De aanpassing van de kruipkromme, betreft de aanpassing van de basiskruipcoëfficiënt. Vooral deze aanpassing leidde tot een duidelijke verbetering wat betreft de voorspelde vervormingen. De gemeten vervorming zijn ongeveer hetzelfde als de berekenen. De voorspelling voor  $t=10.000$  dagen van de vervorming ter plaatse van het midden van de hoofdoverspanning zal ongeveer 45 (!) mm zijn. Vooralsnog lijkt deze 4,5 cm. een correcte voorspelling.
- Zoals eerder gezegd is de gebruikte 'truc' om toch met de Model Code 1990 te kunnen rekenen alleen geschikt in die gevallen waarbij er een in de tijd constante belasting op de constructie aanwezig is. Dus niet tijdens de uitbouwfase. Er is echter toch een poging gedaan om de vervormingen tijdens de bouw te berekenen. Tijdens de bouw zijn namelijk ook continue hoogtemetingen uitgevoerd. De gemeten vervormingen zijn in het algemeen zeer klein, te klein zelfs om mee te rekenen. De orde van grootte van de vervormingen is ongeveer gelijk aan die van de meeton nauwkeurigheden. De vervormingen die groter zijn kunnen in principe wel gebruikt worden. Hierbij spelen echter de meeton nauwkeurigheden een grote rol. De brug zal namelijk enigszins 'kwispelen' door het feit dat eerst aan de ene zijde een moot wordt gestort en vervolgens aan de andere zijde van het hamerstuk. Hierdoor gaat het hamerstuk een beetje kantelen, en de kraagarm kwispelt mee. Nu is de invloed van het kantelen in principe eenvoudig te verdisconteren, ware het niet dat de mate van kanteling in de orde van grootte van de meetfouten ligt, waardoor het lastig wordt om tot betrouwbare resultaten te komen. Nu kan met wat puzzelwerk dit probleem wel omzeild worden, maar het blijft een feit dat de berekeningen volgens Bridges niet tot geheel juiste resultaten leiden tijdens de bouwfase. De gebruikte truc om toch met de MC90 te rekenen is toepasbaar, de berekende en gemeten resultaten komen zeker niet geheel overeen. Echter blijkt dit vooralsnog de enige manier om tot berekende resultaten te komen die qua orde van grootte overeenkomen.



- Ten behoeve van de monitoring van de 2<sup>e</sup> Stichtse Brug zijn in de wanden van een drietal moten zogenoemde meetpuntjes geplakt. Aan de hand van deze puntjes kunnen rekken van de moten bepaald worden. Wanneer met behulp van Bridges ook rekken worden berekend op dezelfde plaatsen waar de meetpunten in de praktijk zijn aangebracht, kan een vergelijking worden gemaakt. Wat blijkt is dat de gemeten rekken (verkortingen) groter zijn dan de berekende. De berekening is uitgevoerd met het materialen-bestand wat voor de hoogtemetingen na asfalteren goede resultaten gaf. De oorzaak van de lage uitkomsten van de berekening is waarschijnlijk weer terug te leiden naar de gebruikte truc.
- In de diverse metingen uit het monitoringrapport blijkt dat de constructie (maar ook de dummy's) gaan zwellen. Er is een poging gedaan deze zwelling te verklaren, er kan echter geen eenduidende verklaring voor gevonden worden.
- Voor de 2<sup>e</sup> Stichtse Brug is ook een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. De resultaten hiervan zijn hieronder kort weergegeven.
  - Indien de permanente belasting (asfalt en schampkanten) met 10% wordt verhoogd of verlaagd, leidt dit respectievelijk tot een verhoging of verlaging van de doorbuiging van ongeveer 7%.
  - Indien de berekeningen met alleen de tijdsafhankelijke vervormingen door kruip wordt uitgevoerd, leidt dit tot een verlaging van de doorbuiging (in het midden van de hoofdo overspanning) van 14 %. De krimp is dus uitgeschakeld.
  - Ook het aanpassen van de voorspanverliezen leidt tot een verandering van de doorbuiging. Tijdens het ontwerp is met relatief hoge verliezen gerekend. Indien nu met gemiddelde waarden wordt gerekend leidt dit tot een berekende vermindering van de doorbuiging van maar liefst 22%. De gebruikte waarden volgen uit de ROBK.
  - Promovendus en onderzoeker Han geeft aanbevelingen voor het aanpassen van de krimp- en kruip-formuleringen van de Model Code 1990. Indien de berekening opnieuw wordt uitgevoerd aan de hand van zijn onderzoek, leidt dit tot een vermindering van de doorbuiging van 5%. Hierbij dient wel opgemerkt dat de formuleringen volgens Han minder bruikbaar zijn. De invloed van de krimp wordt namelijk overschat, waardoor in Bridges te veel verlies in rekening wordt gebracht.
  - Indien aan de tussensteunpunten een zakking van 5mm wordt meegegeven ten opzichte van de landhoofden resulteert dit in een extra zakking van het midden van de hoofdo overspanning van 2,5 mm. Deze extra zakking is dan ten opzichte van de zakking van de tussensteunpunten.
  - Over de bouw gesproken, bij de ontwerp-berekening is van een bouwtijd uitgegaan. In werkelijkheid verloopt de bouw altijd anders. De bouw kan korter of langer duren. In het geval van de 2<sup>e</sup> Stichtse Brug werd de brug 2 maanden eerder gesloten. Hierdoor vielen vakanties op een ander tijdstip dan waar vanuit werd gegaan in de ontwerp-berekening, en werd brug in het algemeen op jongere leeftijd belast. De invloed hiervan is nagenoeg niet merkbaar op  $t=10.000$  dagen. De vervormingen op jonge leeftijd wijken wat meer af, echter na verloop van jaren komen de vervormingslijnen op nagenoeg dezelfde vervorming uit.
- Als laatste zijn binnen dit afstudeerwerk een aantal grindbetonbruggen herberekend. Van een drietal bruggen met een redelijke ouderdom (9.000+) is een invoer-file bekend. Er is een herberekening uitgevoerd aan de hand van de (getunede) Model Code 1990. Verder is er een herberekening aan de hand van de Model Code 1978 uitgevoerd en één aan de hand van de Model Code 1978 met een verhoging van de basiskruip-coëfficiënt met 40%. Deze verhoging is ooit bepaald, omdat destijds bleek dat het vervormingsgedrag goed voorspeld kan worden indien deze verhoging wordt toegepast. Ook in dit afstudeerwerk blijkt dat het geval te zijn. De Model Code 1978 met 40%-verhoging blijkt het vervormingsgedrag zeer goed te voorspellen, met name bij hogere ouderdom. De Model Code 1990 presteert slecht. De vervormingen volgens de Model Code 1990 zijn veel te laag, bijna de helft dan die van de MC78 met 40% verhoging.



## 10.2 Aanbevelingen

Ook de aanbevelingen zullen puntsgewijs worden behandeld.

### *Algemeen*

- In dit afstudeeronderzoek wordt gebruik gemaakt van voorspellingen volgens de CEB-FIP Model Code 1990 welke via een 'truc' toch binnen Bridges wordt toegepast. Er is duidelijk geworden dat het op deze manier toepassen van de MC90 niet altijd tot juiste resultaten leidt. Het verdient dan ook de aanbeveling dat resultaten die binnen dit afstudeeronderzoek zijn weergegeven, nagerekend worden indien er een opvolger is van Bridges. Bij een opvolger van Bridges (ALP++) zal het wel mogelijk zijn om tijdsafhankelijke vervormingen tijdens het bouwproces juist te berekenen, en zullen vervormingen op jonger beton ook een realistischer verloop krijgen.
- Het is aan te bevelen dat Rijkswaterstaat uitbouwbruggen met meer regelmaat meet. Zoals onder andere in de *Voorstudie* is gebleken worden bruggen nog maar zelden gemeten. Hoogtemetingen eens in de vijf jaar verrichten moet toch mogelijk zijn.
- Indien in de toekomst nieuwe laboratoriumproeven worden uitgevoerd, dient het de aanbeveling om deze uit te voeren bij een relatieve vochtigheid van 75% en een (constante) temperatuur van 10 °C. Op deze wijze kan onderzocht worden of de voorschriften de tijdsafhankelijke vervormingen afwijkend voorspellen. Onderzoek wordt nu veelal gedaan bij geconditioneerde omstandigheden van 50 % relatieve vochtigheid en een constante temperatuur van 20 °C.
- Bij het monitoringonderzoek van de 2<sup>e</sup> Stichtse Brug is gebleken dat de dummy's en de brug zelf gaat zwellen. Nader onderzoek hierna is gewenst en kan misschien tot interessante resultaten leiden.
- Indien dummy's in een brug worden geplaatst ten behoeve van onderzoek, plaats deze dan niet onder een gat in het dek. Maar voorkom dat ze nat kunnen worden. Als de dummy's toch onder een gat in het dek moeten worden geplaatst (ivm storten) scherm het gat of de dummy (niet met plastic afdekken) dan af.
- Indien verlengingen of verkortingen gemonitord worden, kunnen deze het beste gemeten worden aan de hand van meetpuntjes. Het toepassen van rekstrookjes op wapeningsstaven is gebleken gevoelig te zijn voor stroomstoringen.
- Het is aan te bevelen dat bij een monitoringsonderzoek ten behoeve van krimpmetingen op jong beton zeer regelmatig wordt gemeten. Bij krimpmetingen speelt de verhardingskrimp een grote rol, deze treedt in de eerste weken na storten op. Dus zo snel mogelijk na het storten meten.

### *Rekentechnisch*

- Pas bij het berekenen van tijdsafhankelijke vervormingen een relatieve vochtigheid van 75% en een constante omgevingstemperatuur van 10 °C toe.
- Het is niet aan te raden om een amplitude voor de relatieve vochtigheid en/of temperatuur te gebruiken. Het wekt de schijn dat men zeer nauwkeurig rekent. Men moet dan echter exact weten wanneer de bouw begint en hoe deze plaatsvindt. Bij de ontwerp-berekening kan men nooit voorzien hoe de bouw verloopt. Daarom is ook niet aan te raden een amplitude toe te passen.
- Bij het berekenen van hogesterkte betonbruggen (B35) blijkt de Model Code 1990 tot de beste resultaten te leiden. Het is dan ook aan te bevelen dit voorschrift te gebruiken bij de berekening van (toekomstige) uitbouwbruggen.
- Bij het (her)berekenen van grindbetonbruggen blijkt de Model Code 1978 met een verhoging van de basiskruipcoëfficiënt met 40% te leiden tot de beste resultaten. Indien bruggen herberekend worden kan dan ook het beste van dit voorschrift met de genoemde aanpassing worden uitgegaan.
- Het is aan te bevelen om tijdens het ontwerp van een nieuw te bouwen brug een gevoeligheidsanalyse uit te voeren. Er is namelijk gebleken dat (kleine) afwijkingen van onder andere de permanente belasting en de voorspanverliezen een redelijke invloed hebben op het vervormingsgedrag. Bij een gevoeligheidsanalyse dient gevarieerd te worden met de E-modulus, krimp- en kruipfactor en de voorspanverliezen.
- Bij het toepassen van hogesterkte beton en het programma Bridges, dient in het materialen-bestand een cement-coëfficiënt van 3 te worden toegepast.
- Het wordt ook aanbevolen (indien mogelijk) om een onderzoek uit te voeren naar het krimp- en kruipgedrag, de ontwikkeling van de sterkte en de E-modulus van een nieuw te bouwen brug. Indien in een vroeg stadium de mengsamenstelling bekend is, zou het mogelijk kunnen zijn om gedurende een aantal maanden dergelijke proeven uit te voeren. Gebleken is dat voornamelijk de kruipvervorming van laboratoriumwaarden nogal kan afwijken van voorspelde waarden volgens de voorschriften.



## Literatuurlijst

- [1] **F.G. Klijn Velderman** (juli 1990)  
Vervormingsgedrag van betonnen uitbouwbruggen in theorie en praktijk.  
Een studie naar het programma Bouw van Rijkswaterstaat. (Afstudeerrapport)
- [2] **D.G. Schaafsma** (augustus 1991)  
Tijdsafhankelijk vervormingsgedrag van uitbouwbruggen. (Afstudeerrapport)
- [3] **R. Beem** (augustus 1991)  
Modellering van tijdsafhankelijke effecten in Diana. (Afstudeerrapport)
- [4] **M.R.A. van Vliet** (september 1993)  
Gefaseerde analyse van een uitbouwbrug met Diana.  
Beschouwing van de modellering inclusief tijdsafhankelijke effecten. (Afstudeerrapport)
- [5] **A.P.H. van Liebergen** (maart 1995)  
Vervormingsgedrag van betonnen uitbouwbruggen.  
Gefaseerde analyse van een uitbouwbrug met Diana. (Afstudeerrapport)
- [6] **C. van der Vliet** (maart 1997)  
Temperatuursinvloeden op betonnen uitbouwbruggen. (Afstudeerrapport)
- [7] **A.G. Tolboom** (november 1998)  
Tijdsafhankelijk gedrag van HSB-uitbouwbruggen. (Afstudeerrapport)
- [8] **G.W. Gall** (April 1997)  
Krimp- en temperatuureffecten in HSB-uitbouwbruggen (Afstudeerrapport)
- [9] **Ir. J. Brakel** (oktober 1997)  
Betonnen Bruggen deel II. (Collegedictaat G29, TU Delft)
- [10] **Comite Euro-International Du Beton**  
CEB-FIP Model Code 1978
- [11] **Comite Euro-International Du Beton**  
CEB-FIP Model Code 1990 – Design Code
- [12] **NNI** (september 1995)  
Voorschriften Beton TGB 1990 – NEN 6720  
Constructieve eisen en rekenmethoden (VBC 1995)
- [13] **CUR**  
CUR-aanbeveling 39 – Hoge Sterkte Beton
- [14] **Dr.ir. C. v.d. Veen / E.M. Horeweg (TU Delft)** (November 1999)  
Monitoring uitbouwbruggen in Hogere Sterkte Beton  
Meetrapport, rapportnr.: 25.5-99-11.
- [15] **Ing. A.P. van der Marel / E.M. Horeweg (TU Delft)** (November 1998)  
Onderzoek eigenschappen beton B85  
Deel 1: Bepaling materiaaleigenschappen

- [16] **Prof. Dr. ir. K. van Breugel (TU Delft)** (Juni 2000)  
Onderzoek eigenschappen beton B65,  
in het bijzonder het krimpgedrag van verschillende betonmengsels.
- [17] **Prof. dr. ir. J.C. Walraven / H. Han, BSc** (Juli 1996)  
Hoogwaardig beton in de prefab-industrie  
Deel 2: krimp en kruip van beton met hoge sterkte (voorstel aanpassing CUR 37)
- [18] **Ningxu Han** (1996)  
Time Dependent Behaviour of High Strength Concrete
- [19] **Femmasse B.V.**  
Handleiding Bridges



## **Bijlagen**





## Inhoudsopgave van de Bijlagen

<b>BIJLAGE A DE DIVERSE VOORSCHRIFTEN (HFDST. 3)</b>	<b>3</b>
A.1 MODEL CODE 1978	5
A.1.1 Algemeen	5
A.1.2 Kruip	7
A.1.3 Krimp	9
A.2 MODEL CODE 1990	11
A.2.1 Algemeen	11
A.2.2 Kruip	12
A.2.3 Krimp	17
A.3 EUROCODE	19
A.4 NEN 6720 – VBC 1995	21
A.4.1 Algemeen	21
A.4.2 Kruipvervorming	21
A.4.3 Krimpvervorming	23
<b>BIJLAGE B DE HANDBEREKENING (HFDST. 6)</b>	<b>25</b>
B.1 HET INVOERGEDEELTE	27
B.2 KRUIPBEREKENING	29
B.2.1 De Model Code 1978	29
B.2.2 De Model Code 1990	30
B.2.3 De VBC	32
B.3 KRIMPBEREKENING	33
B.3.1 De Model Code 1978	33
B.3.2 De Model Code 1990	34
B.3.3 De VBC	35
B.4 REKENVOORBEELD	36
B.4.1 Kruip	36
B.4.1.1 Model Code 1978	36
B.4.1.2 Model Code 1990	37
B.4.1.3 VBC	39
B.4.2 Krimp	40
B.4.2.1 Model Code 1978	40
B.4.2.2 Model Code 1990	40
B.4.2.3 VBC	41
B.4.3 De totale vervormingen	41
<b>BIJLAGE C VERVORMINGSGRAFIEKEN 2<sup>e</sup> STICHTSE BRUG (HFDST. 8)</b>	<b>43</b>





**Bijlage A**

**De diverse voorschriften (Hfdst. 3)**





## A.1 Model Code 1978

### A.1.1 Algemeen

In deze paragraaf worden de krimp en kruipformulering behandeld zoals deze worden voorgeschreven in de CEB-FIP Model Code 1978

In de formules komen een aantal symbolen naar voren die worden toegelicht, een aantal van deze symbolen kunnen in de MC op twee manieren bepaald worden, grafisch als rekenkundig d.m.v. formules. Hier zullen zowel deze formules als de grafieken worden weergegeven.

#### Definities

In constante omgevingsomstandigheden kan het volgende worden gedefinieerd:

- kruip is de toename van de vervorming in de tijd onder langdurige spanning;
- relaxatie is de afname van spanning in de tijd, onder constant opgelegde vervormingen;
- krimp is de betonverkortingsproces onafhankelijk van de belasting.

De totale rek ( $\epsilon_c(t)$ ) op tijdstip  $t$ , van een betonnen element die belast wordt op tijdstip  $t_0$  met een constante spanning  $\sigma_c(t_0)$  mag als volgt worden onderverdeeld, zie hiervoor ook de voorstudie:

$$\begin{aligned}\epsilon_c(t) &= \epsilon_{ci}(t_0) + \epsilon_{cc}(t) + \epsilon_{cs}(t) + \epsilon_{cT}(t) \\ &= \epsilon_{cc}(t) + \epsilon_{cn}(t)\end{aligned}\tag{A.1.1}$$

Hierin is:

$\epsilon_{ci}(t_0)$	de initiële belastingsvervorming
$\epsilon_{cc}(t)$	de kruipvervorming op $t > t_0$
$\epsilon_{cs}(t)$	de krimpvervorming
$\epsilon_{cT}(t)$	de temperatuursvervorming
$\epsilon_{c\sigma}(t)$	de spanningsafhankelijke vervorming
$\epsilon_{cn}(t)$	de spanningsonafhankelijke vervorming

#### Toepassingsgebied

In de formuleringen wordt kruip en krimp van beton behandeld, waarbij de drukspanning ten hoogste gelijk is aan 40% van de karakteristieke betondruksterkte op een leeftijd van  $j$  dagen ( $\sigma \leq 0,4 f_{ckj}$ ) en waarvan het verhardingsproces niet onder buitensporige omstandigheden verloopt. Tevens wordt er vanuit gegaan dat het superpositiebeginsel geldig is. Dit houdt in dat spannings- en vervormingsveranderingen uit de verschillende tijds- en belastingstappen opgeteld mogen worden.

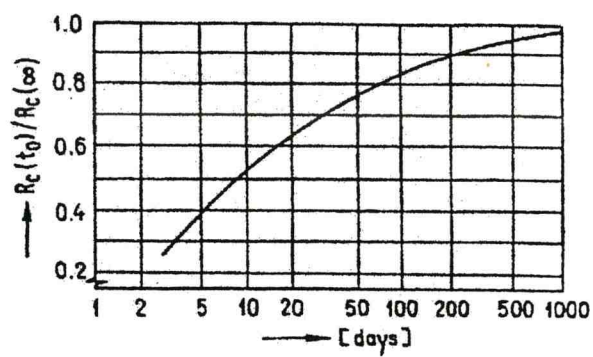


Fig. A.1 De variatie van de sterkte van beton in relatie tot de tijd

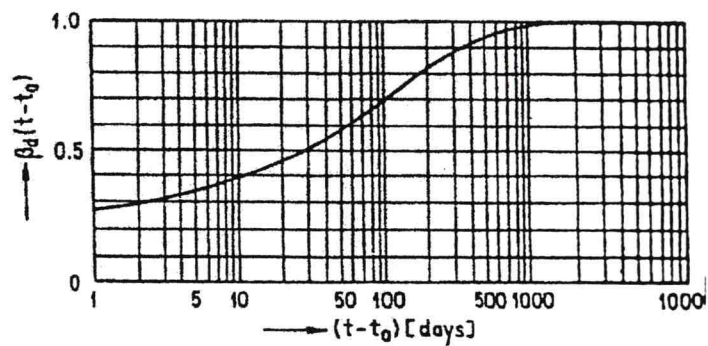


Fig. A.2 De ontwikkeling van de vertraagde elastische vervorming in de tijd



### A.1.2 Kruip

De algemene uitdrukking voor kruipvervorming wordt als volgt gedefinieerd:

$$\varepsilon_{cc}(t, t_0) = \frac{\sigma_0}{E_c(28)} \varphi(t, t_0) \quad (A.1.2)$$

Hierin is:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{cc}(t, t_0) & \text{ kruipvervorming op tijdstip } t \text{ onder constante spanning } \sigma_0 \text{ aangebracht op tijdstip } t_0 \\ E_c(28) & \text{ de elasticiteitsmodulus op tijdstip } t_0 = 28 \text{ dagen, deze wordt berekend met behulp van:} \\ & E_c(t_0) = 9500 \cdot \sqrt[3]{f_{cm}(t_0)} \quad (A.1.3) \\ \varphi(t, t_0) & \text{ kruipcoëfficiënt op tijdstip } t \text{ voor beton waarbij een spanning aangebracht is op tijdstip } t_0. \end{aligned}$$

Verder is:

$$\begin{aligned} f_{cm}(t_0) & \text{ de gemiddelde betondruksterkte op tijdstip } t_0. \\ t & \text{ de ouderdom van het beton in dagen} \\ t_0 & \text{ de ouderdom van het beton in dagen op het moment dat de spanning aangebracht wordt.} \end{aligned}$$

In de elastische vervorming komt de term  $E_c(t_0)$  naar voren, dit is de elasticiteitsmodulus op tijdstip  $t_0$ , welke berekend wordt met behulp van:

$$E_c(t) = 1,1325 \cdot E_c(28) \cdot \sqrt[3]{1 - t^{-0,35}} \quad (A.1.4)$$

De totale vervorming op tijdstip  $t$  onder constante spanning, (d.w.z. de elastische vervorming op tijdstip  $t_0$  plus de kruipvervorming), wordt gegeven door:

$$\varepsilon_{cc}(t, t_0) = \sigma_0 \cdot \left[ \frac{1}{E_c(t_0)} + \frac{\varphi(t, t_0)}{E_c(28)} \right] = \sigma_0 \cdot J(t, t_0) \quad (A.1.5)$$

Hierin stelt  $J(t, t_0)$  de 'kruipfunctie' voor. De kruipfunctie wordt bepaald door middel van de volgende functie:

$$J(t, t_0) = \frac{1}{E_c(t_{0,c})} + \frac{\beta_a(t_{0,c})}{E_{c,28}} + \frac{\varphi_d \cdot \beta_d(t_c - t_{0,c})}{E_{c,28}} + \frac{\varphi_f \cdot (\beta_f(t_c) - \beta_f(t_{0,c}))}{E_{c,28}} \quad (A.1.6)$$

Hierin is:

$$t_c \quad \text{de gecorrigeerde ouderdom van het beton in dagen. Deze wordt gecorrigeerd indien de omgevingstemperatuur duidelijk verschilt van de waarde } 20^\circ\text{C} \text{ of het cementtype anders is dan van normaal en langzaam hardend cement. De gecorrigeerde ouderdom wordt berekend volgens:}$$

$$t_c = \frac{\alpha_c}{30} \cdot \int (T(t) + 10) dt \quad (A.1.7)$$

waarin:

$$\alpha_c \quad \text{de factor is die de invloed van het cementtype in rekening brengt, deze is gelijk aan:}$$

1 voor normaal en langzaam hardend cement

2 voor snelhardend cement

3 voor snelhardend en hoge sterkte cement

$$T(t) \quad \text{de temperatuur in } ^\circ\text{Celsius} \text{ op tijdstip } t \text{ dagen.}$$

$$t_{0,c} \quad \text{de gecorrigeerde ouderdom van het beton in dagen op het moment dat de spanning aangebracht wordt.}$$

$$t - t_0 \quad \text{het beschouwde interval}$$

$$\beta_a(t_0) \quad \text{het omkeerbare deel van de vervorming dat zich voordoet in de eerste dagen dat de constructie wordt belast. Zie ook Fig. A.1. Deze factor kan ook berekend worden volgens:}$$

$$\beta_a(t_0) = 0,8 \cdot \left( 1 - \frac{f_c(t_0)}{f_c(\infty)} \right) = 0,95 \cdot t_0^{-0,3} - 0,1 \quad (A.1.8)$$

$$\varphi_d \quad \text{de coëfficiënt voor de vertraagd optredende elastische vervormingen, de waarde wordt standaard gelijk gesteld aan 0,4.}$$

$$\beta_d(t_c - t_{0,c}) \quad \text{de coëfficiënt die de ontwikkeling van de vertraagde elastische vervorming in de tijd representeert, zie ook Fig. A.2. Deze waarde kan ook berekend worden volgens:}$$

$$\beta_d(t - t_0) = 0,28 + 0,5 \cdot \arctan(0,011 \cdot (t - t_0))^2 \quad (A.1.9)$$

Omgeving- situatie	Relatieve Vochtigheid	Coëfficiënten voor kruip                      krimp		Coëfficiënt $\lambda$
		$\phi_p$	$\epsilon_{sl}$	
Water	100%	0,8	+ 0,00010	30
Zeer vochtige atmosfeer	90%	1,0	- 0,00013	5
Buiten in het algemeen	70%	2,0	- 0,00032	1,5
Zeer droge atmosfeer	40%	3,0	- 0,00052	1

Tabel A.1 Coëfficiënten voor krimp en kruip

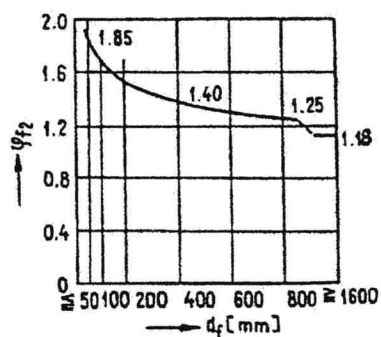


Fig. A.3 Kruip in relatie tot de fictieve dikte

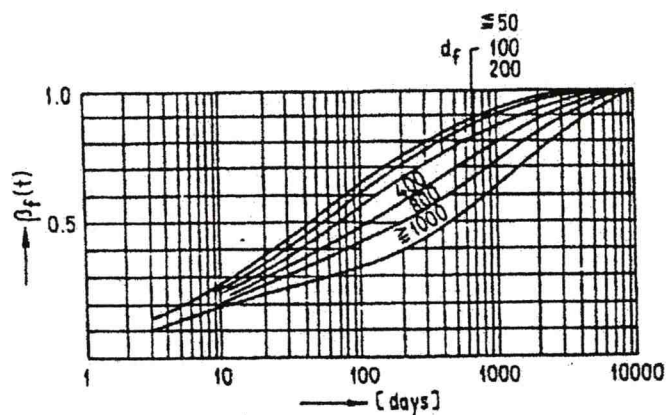


Fig. A.4 De ontwikkeling van de onomkeerbare vervormingen in de tijd

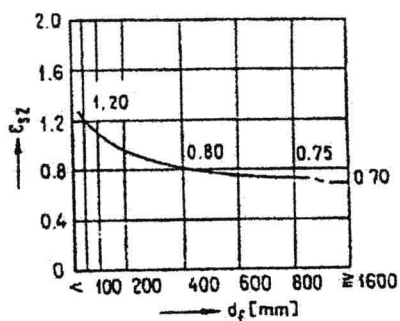


Fig. A.5 Krimp in relatie tot de fictieve dikte

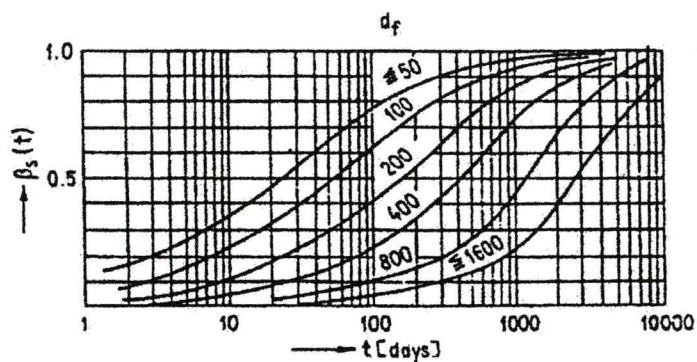


Fig. A.6 Ontwikkeling van de krimp in de tijd



$\varphi_f$  de coëfficiënt die de onomkeerbare vervorming representeert.  $\varphi_f$  wordt gelijk gesteld aan het produkt van twee deelcoëfficiënten, namelijk  $\varphi_{f1}$  en  $\varphi_{f2}$ .

$\varphi_{f1}$  de deelcoëfficiënt welke afhankelijk is van de relatieve vochtigheid, zie voor de waarde Tabel A.1

Deze waarde kan ook berekend worden met de onderstaande formule.

$$\varphi_{f1} = \frac{RV^2 - 170 \cdot RV + 8990}{RV^2 - 120 \cdot RV + 4510} \quad (\text{A.1.10})$$

$\varphi_{f2}$  de deelcoëfficiënt welke afhankelijk is van de fictieve dikte  $d_f$ , zie voor de waarde Fig. A.3. De formule waarmee deze figuur is bepaald is:

$$\varphi_{f2} = 1,1089 + 0,8469 \cdot e^{-0,0027 \cdot d_f} \quad (\text{A.1.11})$$

$\beta_f$  een functie die de ontwikkeling van de onomkeerbare vervorming in de tijd representeert, deze functie is afhankelijk van de fictieve dikte en de waarde wordt bepaald uit Fig. A.4, of uit onderstaande formules:

$$\beta_f(t) = 1 - e^{-(A_f \cdot t)^{B_f}} \quad (\text{A.1.12})$$

waarin:

$$A_f = 0,078 \cdot e^{-1,22 \cdot \log d_f} \quad (\text{A.1.13})$$

$$B_f = 0,528 \cdot e^{-0,13 \cdot \log d_f} \quad (\text{A.1.14})$$

Verder is

$d_f$  de fictieve dikte in mm, deze wordt gedefinieerd door:

$$d_f = \lambda \frac{2 \cdot A_c}{U_c} \quad (\text{A.1.15})$$

Hierin is:

$\lambda$  de coëfficiënt die afhankelijk is van het klimaat, zie ook Tabel A.1 en de onderstaande formule.

$$\lambda = \frac{RV^2 - 191 \cdot RV + 10500}{RV^2 - 213,5 \cdot RV + 11400} \quad (\text{A.1.16})$$

$A_c$  het oppervlak van de betondoorsnede

$U_c$  de omtrek van het beton dat in contact is met de omgeving.

### A.1.3 Krimp

De krimpvervorming die zich ontwikkelt in het tijdsinterval  $t-t_0$  wordt gegeven door:

$$\varepsilon_{cs}(t, t_0) = \varepsilon_{s0} \cdot [\beta_s(t) - \beta_s(t_0)] \quad (\text{A.1.17})$$

Hierin is:

$\varepsilon_{s0}$  de basis krimpcoëfficiënt, die het produkt vormt van twee deelcoëfficiënten  $\varepsilon_{s0} = \varepsilon_{s1} \cdot \varepsilon_{s2}$ .

$\varepsilon_{s1}$  de deelcoëfficiënt die afhankelijk is van de relatieve vochtigheid, zie voor de waarde van de coëfficiënt Tabel A.1.

$\varepsilon_{s2}$  de deelcoëfficiënt welke afhankelijk is van de fictieve dikte, zie voor het verloop van de waarde Fig. A.5, of onderstaande formule.

$$\varepsilon_{s2} = 0,7001 + 0,6292 \cdot e^{-0,0046 \cdot d_f} \quad (\text{A.1.18})$$

$\beta_s$  de functie die de ontwikkeling van de krimp in de tijd weergeeft afhankelijk van de fictieve dikte, zie voor het verloop van de functie Fig. A.6, of wederom de volgende formule.

$$\beta_s = 1 - e^{-(A_s \cdot t)^{B_s}} \quad (\text{A.1.19})$$

Waarin:

$$A_s = 3,16 \cdot e^{-2,98 \cdot \log d_f} \quad (\text{A.1.20})$$

$$B_s = 0,18 \cdot e^{0,49 \cdot \log d_f} \quad (\text{A.1.21})$$





## A.2 Model Code 1990

### A.2.1 Algemeen

Deze paragraaf behandelt de krimp- en kruipformulering zoals deze wordt voorgeschreven in de CEB-FIP Model Code 1990.

#### Definities

Het onderscheid tussen kruip en krimp is traditioneel. Normaliter worden de vertraagde rekken van belast of onbelast beton beschouwd als twee aspecten van eenzelfde fysische fenomeen. Ook heeft het onderscheid tussen initiële rek en krimprek een traditionele oorzaak. In een constructie analyse is de totale rek zoals die gegeven wordt in de kruipfunctie van belang. De initiële- en krimprek worden consistent gedefinieerd zodat hun som resulteert in de correcte rek die van de belasting afhankelijk is.

De totale rek ( $\epsilon_c(t)$ ) op tijdstip  $t$ , van een betonnen element dat belast wordt op tijdstip  $t_0$  met een constante spanning  $\sigma_c(t_0)$  mag als volgt worden onderverdeeld, deze is hetzelfde als de formulering A.1.1:

$$\begin{aligned}\epsilon_c(t) &= \epsilon_{ci}(t_0) + \epsilon_{cc}(t) + \epsilon_{cs}(t) + \epsilon_{cT}(t) \\ &= \epsilon_{cc}(t) + \epsilon_{cn}(t)\end{aligned}\tag{A.2.1}$$

Hierin is:

$\epsilon_{ci}(t_0)$	de initiële belastingsrek
$\epsilon_{cc}(t)$	de kruiprek op $t > t_0$
$\epsilon_{cs}(t)$	de krimprek
$\epsilon_{cT}(t)$	de temperatuursrek
$\epsilon_{cc\sigma}(t)$	de spanningsafhankelijke rek
$\epsilon_{cn}(t)$	de spanningsonafhankelijke rek

#### Toepassingsgebied

De voorspellingen voor krimp en kruip moeten worden beschouwd als voorspellingen van het gemiddelde gedrag van een betonnen doorsnede. Behalve als er speciale maatregelen worden toegepast is het model geldig voor normaal constructiebeton ( $12 \text{ MPa} < f_{ck} < 80 \text{ MPa}$ ) onderworpen aan een drukspanning die kleiner is dan  $0,4 f_{ck}(t_0)$ . Tevens moet de gemiddelde relatieve vochtigheid liggen tussen de 40 en 100% en de gemiddelde temperatuur tussen de 5 en  $30^\circ\text{C}$ .

### A.2.2 Kruip

Beton wordt hierbij beschouwd als een ouder wordend visco-elastisch materiaal. In werkelijkheid is kruip echter een niet-lineair fenomeen. Deze niet-lineariteit kan het best worden geobserveerd bij spanningen boven de  $0,4 f_{ck}$  maar in sommige gevallen ook beneden deze grens.

#### a) Aannames en gerelateerde basisvergelijkingen

Binnen de grenzen van het toepassingsgebied, wordt kruip beschouwd zich lineair ten opzichte van de spanning te gedragen. Voor een constante spanning aangebracht op  $t_0$  leidt dit tot:

$$\varepsilon_{cc}(t, t_0) = \frac{\sigma_c(t_0)}{E_{ci}} \cdot \phi(t, t_0) \quad (\text{A.2.2})$$

Hierin is:

- $t$  de leeftijd van het beton in dagen
- $t_0$  de leeftijd van het beton op moment van belasten in dagen
- $\phi(t, t_0)$  de kruipcoëfficiënt. (Zie b) )
- $E_{ci}$  de 28-daagse elasticiteitsmodulus, deze wordt berekend volgens:

$$E_{ci} = E_{c0} \cdot \left( \frac{f_{cm}}{f_{cm0}} \right)^{1/3} \quad (\text{A.2.3})$$

Hierin is dan weer:

- $E_{c0}$  heeft een vaste waarde van  $2,15 \cdot 10^4$  MPa.
  - $f_{cm}$  de gemiddelde cilinderdruksterkte van beton op een leeftijd van 28 dagen. Zie ook hieronder, vergelijking A.2.4 en verder.
  - $f_{cm0}$  heeft ook een vaste waarde van 10 MPa.
- Indien er alleen maar een elastische analyse van de constructie wordt gemaakt, moet er een gereduceerde elasticiteitsmodulus ( $E_c$ ) worden toegepast, hierdoor worden de initiële plastische rekken meegenomen. De reductie bedraagt 10%.

De druksterkte van beton op leeftijd  $t$  hangt af van het type cement, de temperatuur en de omstandigheden tijdens verharden. Bij een gemiddelde temperatuur van  $20^\circ\text{C}$  en omstandigheden tijdens verharding die in overeenstemming zijn met de richtlijnen kan de relatieve druksterkte van beton van verschillende leeftijd  $f_{cm}(t)$  geschat worden volgens:

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{cm} \quad (\text{A.2.4})$$

met:

$$\beta_{cc}(t) = e^{s \cdot \left( 1 - \sqrt[3]{\frac{28}{t_1}} \right)} \quad (\text{A.2.5})$$

Hierin is:

- $\beta_{cc}(t)$  de coëfficiënt die afhankelijk is van de betonleeftijd  $t$ .
- $t_1$  1 dag
- $s$  de coëfficiënt welke afhankelijk is van het cementtype, waarbij voor de waarde van de coëfficiënt geldt:
  - 0,20 voor snelhardend hoge sterkte cement
  - 0,25 voor normaal en snelhardend cement
  - 0,38 voor langzaamhardend cement
- $f_{cm} = f_{ck} + 8$

Hierin is dan weer  $f_{ck}$  de cylinder-druksterkte volgens onderstaande tabel.

$f_{ck}$ -cilinder	12	20	30	40	50	60	70	80
$f_{ck}$ -kubus	15	25	37	50	60	70	80	90



De spanningsafhankelijke rek mag als volgt worden uitgedrukt:

$$\varepsilon_{\sigma\sigma}(t, t_0) = \sigma_c(t_0) \cdot \left[ \frac{1}{E_c(t_0)} + \frac{\phi(t, t_0)}{E_{ci}} \right] = \sigma_c(t_0) \cdot J(t, t_0) \quad (\text{A.2.6})$$

Hierin is:

$J(t, t_0)$  de kruipfunctie van de totale spanningsafhankelijke vervormingen per spanningseenheid.

$E_c(t_0)$  de elasticiteitsmodulus op het moment van belasten ( $t_0$ ).

De ontwikkeling van de elasticiteitsmodulus in de tijd wordt berekend volgens:

$$E_c(t) = \beta_E(t) \cdot E_{ci} \quad (\text{A.2.7})$$

met:

$$\beta_E(t) = \sqrt{\beta_{cc}(t)} \quad (\text{A.2.8})$$

hierin is:

$\beta_E(t)$  de coëfficiënt die afhankelijk is van de betonleeftijd  $t$

$\beta_{cc}(t)$  de coëfficiënt die afhankelijk is van de betonleeftijd  $t$  volgens vergelijking A.2.5.

Voor wisselende spanningen en rekken, mag het superpositie principe worden toegepast. Het toepassen van het superpositie principe is consistent met de aanname dat kruip zich lineair gedraagt ten opzichte van de spanningen. Doordat het werkelijke gedrag van beton niet-lineair is, zijn fouten in de voorspelling onafwendbaar, vooral wanneer er sprake is van afnemende spanningen of rekken.

#### b) De kruipcoëfficiënt

De vergelijkingen waarmee de kruipcoëfficiënt wordt berekend zijn empirisch. Ze zijn vastgesteld op basis van laboratoriumproeven op constructiebeton. De kruipcoëfficiënt mag worden bepaald volgens:

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \cdot \beta_c(t - t_0) \quad (\text{A.2.9})$$

Hierin is:

$\phi_0$  de basis kruipcoëfficiënt.

$\beta_c(t-t_0)$  de coëfficiënt die de ontwikkeling van de kruip in de tijd na belasten beschrijft.

De basis kruipcoëfficiënt wordt geschat uit:

$$\phi_0 = \phi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0) \quad (\text{A.2.10})$$

met:

$$\phi_{RH} = 1 + \frac{1 - \frac{RH}{RH_0}}{0,46 \cdot \left( \frac{h}{h_0} \right)^{1/3}} \quad (\text{A.2.11})$$

en:

$$\beta(f_{cm}) = \frac{5,3}{\sqrt{f_{cm}/f_{cm0}}} \quad (\text{A.2.12})$$

en:

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0,1 + \left( t_0/t_1 \right)^{0,2}} \quad (\text{A.2.13})$$

In de formules van de vorige bladzijde zijn:

RH de relatieve vochtigheid van de omgeving [%]

RH<sub>0</sub> 100 %

h de fictieve dikte in mm, die als volgt berekend wordt:

$$h = \frac{2 \cdot A_c}{u} \quad (\text{A.2.14})$$

met:

A<sub>c</sub> het oppervlak van de betondoorsnede

u de omtrek van het beton dat in contact is met de omgeving.

h<sub>0</sub> 100 mm.

f<sub>cm</sub> de gemiddelde cilinderdruksterkte van beton op 28 dagen.

f<sub>cm0</sub> 10 MPa

t<sub>1</sub> 1 dag.

De ontwikkeling van de kruip in de tijd wordt gegeven door:

$$\beta_c(t-t_0) = \left( \frac{\frac{(t-t_0)}{t_1}}{\beta_H + \frac{(t-t_0)}{t_1}} \right)^{0.3} \quad (\text{A.2.15})$$

Hierin is:

t<sub>1</sub> 1 dag

RH<sub>0</sub> 100 %

h<sub>0</sub> 100 mm.

$$\beta_H = 150 \cdot \left\{ 1 + \left( 1,2 \cdot \frac{RH}{RH_0} \right)^{18} \right\} \cdot \frac{h}{h_0} + 250 \leq 1500 \quad (\text{A.2.16})$$

Door de onsamenvhangende verdeling van kruip- en krimpvervormingen, de fouten van het model en de algemene onbekendheid met de precieze materiaal- en klimaatgegevens kan de voorspelling een aanzienlijke fout in zich hebben. Na een korte belastings- en uitdrogingsperiode is deze groter dan bij langere perioden. Gebaseerd op laboratoriumproeven schat met de variatie in de voorspellingen op zo'n 20%. Indien men aanneemt dat men te maken heeft met een normaalverdeling, kan dit tot fouten leiden van 25% van de gemiddelde waarden. Bij een probabilistisch ontwerp moeten deze fouten waar nodig mee worden genomen in de berekening.

Het is niet duidelijk of de kruip een eindige waarde nadert. Desalniettemin benadert vergelijking A.2.15 een eindige waarde voor  $t \rightarrow \infty$ . Evaluaties van deze vergelijking tonen aan dat deze vergelijking een goede schatting is voor de kruip bij belastingen die tot 70 jaar aanhouden. Belastingen die nog langer aanhouden verschillen niet meer dan 5% van de waarde die bereikt wordt na 70 jaar.



c) *Het effect van het type cement en de temperatuur voordat een belasting wordt aangebracht.*

Het effect dat de temperatuur op de kruip van het beton heeft, wordt in rekening gebracht door middel van een gecorrigeerde leeftijd. De gecorrigeerde leeftijd ten gevolge van de temperatuur  $t_T$  wordt berekend met de onderstaande vergelijking, deze wordt gebruikt om in de daaronder staande formule in te vullen.

$$t_T = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot e^{\left( \frac{13,65 - \frac{4000}{273 + \frac{T(\Delta t_i)}{T_0}}}{T_0} \right)} \quad (\text{A.2.17})$$

Hierin is:

$\Delta t_i$	het aantal dagen waarbij er een temperatuur $T$ optreedt
$T(\Delta t_i)$	de temperatuur ( $^{\circ}\text{C}$ ) gedurende $\Delta t_i$ dagen
$T_0$	$1^{\circ}\text{C}$ .

Het effect dat het type cement op de kruip van de beton heeft, wordt bepaald met de volgende vergelijking:

$$t_o = t_{0,T} \cdot \left[ \frac{9}{2 + \left( \frac{t_{0,T}}{t_{1,T}} \right)^{1,2}} + 1 \right]^{\alpha} \geq 0,5 \text{ dagen} \quad (\text{A.2.18})$$

Hierin is:

$t_{0,T}$	de leeftijd van beton op moment van belasten volgens vergelijking A.2.17.
$t_{1,T}$	1 dag
$\alpha$	de coëfficiënt welke afhankelijk is van het type cement, waarbij voor de waarde van de coëfficiënt geldt:
-1	voor langzaamhardend cement
0	voor normaal- en snelhardend cement
1	voor snelhardend hoge sterkte cement.

Let wel:

De leeftijdscorrectie die hier plaats vindt, geldt voor beton waarop nog geen belasting is geplaatst, is dit wel het geval zie het kopje "temperatuureffecten op kruip".

d) *Het effect van hoge spanningen*

Bij spanningen hoger dan  $0,4 \cdot f_{cm}(t_0)$  mag kruip niet meer lineair worden beschouwd vanwege micro-scheuren ten gevolge van krimp of hoge spanningen.

Om dit effect in rekening te brengen mag de volgende benadering worden gebruikt:

$$\phi_{0,k} = \phi_0 \quad \text{voor } k \leq 0,4 \quad (\text{A.2.19})$$

$$\phi_{0,k} = \phi_0 \cdot e^{1,5 \cdot (k_{\sigma} - 0,4)} \quad \text{voor } 0,4 < k \leq 0,6 \quad (\text{A.2.20})$$

Hierin is:

$\phi_{0,k}$	de niet-lineaire kruipcoëfficiënt die $\phi_0$ vervangt in vergelijking A.2.9.
$k_{\sigma}$	de spanning-sterkte ratio, ofwel $\sigma_0/f_{cm}$ .

e) *Temperatuureffecten tijdens belastingfasen op de kruip*

Het effect van temperatuur voordat er belasting wordt aangebracht kan worden berekend volgens formule A.2.17.

Onderstaande formules beschrijven het effect van een constante temperatuur die ongelijk is aan 20°C, terwijl het beton belast wordt.

Het effect van temperatuur op tijdontwikkeling van kruip wordt in rekening gebracht in onderstaande formule:

$$\beta_{H,T} = \beta_H \cdot \beta_T \quad (\text{A.2.21})$$

met:

$$\beta_T = e^{\left[ \frac{1500}{273 + T/T_0} - 5,12 \right]} \quad (\text{A.2.22})$$

Hierin is:

$\beta_{H,T}$  een temperatuurs-afhankelijke coëfficiënt, welke  $\beta_H$  vervangt in formule A.2.15.

$\beta_H$  een coëfficiënt volgens formule A.2.16

$T_0$  1°C.

Het effect van de temperatuur op de kruipcoëfficiënt wordt als volgt in rekening gebracht:

$$\phi_{RH,T} = \phi_T + (\phi_{RH} - 1) \cdot \phi_T^{1,2} \quad (\text{A.2.23})$$

met:

$$\phi_T = e^{\left[ 0,015 \left( \frac{T}{T_0} - 20 \right) \right]} \quad (\text{A.2.24})$$

Hierin is:

$\phi_{RH,T}$  een temperatuurs-afhankelijke coëfficiënt, welke  $\phi_{RH}$  vervangt in formule A.2.10.

$\phi_{RH}$  is een coëfficiënt volgens formule A.2.11.

$T_0$  1°C.

Bij een toename van temperatuur boven de 20°C, terwijl het constructie element wordt belast, mag kruip worden geschat volgens:

$$\phi_{(t,t_0,T)} = \phi_0 \cdot \beta_c(t - t_0) + \Delta\phi_{T,trans} \quad (\text{A.2.25})$$

met:

$$\Delta\phi_{T,trans} = 0,0004 \cdot \left( \frac{T}{T_0} - 20 \right)^2 \quad (\text{A.2.26})$$

Hierin is:

$\phi_0$  de basiskruip coëfficiënt volgens vergelijking A.2.10 en gecorrigeerd naar temperatuur volgens vergelijking A.2.23.

$\beta_c(t-t_0)$  een coëfficiënt die de ontwikkeling in de tijd van kruip beschrijft volgens vergelijking A.2.15 en naar temperatuur gecorrigeerd volgens A.2.21 en A.2.22.

$\Delta\phi_{T,trans}$  de transiente thermische kruip coëfficiënt welke in de tijd plaats vindt bij temperatuurstoename.  
 $T_0$  1°C.

Als laatste moet ook de Elasticiteitsmodulus gecorrigeerd worden volgens:

$$E_{ci}(T) = E_{ci} \cdot \left( 1,06 - 0,003 \cdot \frac{T}{T_0} \right) \quad (\text{A.2.27})$$

Hierin is:

$E_{ci}$  de elasticiteitsmodulus volgens formule A.2.3

$T$  de temperatuur

$T_0$  1°C.



### A.2.3 Krimp

De totale krimp (of zwellings) mag berekend worden volgens:

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cs0} \cdot \beta_s(t - t_s) \quad (\text{A.2.28})$$

Hierin is:

$t$	de leeftijd van het beton in dagen
$t_s$	de leeftijd van het beton op het moment dat het beton gaat krimpen cq. zwellen.
$\varepsilon_{cs0}$	de basiskrimpcoëfficiënt, zie hieronder
$\beta_s(t - t_s)$	de coëfficiënt die de ontwikkeling van de krimp in de tijd beschrijft, zie even verderop.

De basis krimpcoëfficiënt wordt berekend uit:

$$\varepsilon_{cs0} = \varepsilon_s(f_{cm}) \cdot \beta_{RH} \quad (\text{A.2.29})$$

met:

$$\varepsilon_s(f_{cm}) = \left[ 160 + 10 \cdot \beta_{sc} \cdot \left( 9 - \frac{f_{cm}}{f_{cm0}} \right) \right] \cdot 10^{-6} \quad (\text{A.2.30})$$

In deze twee formules zijn:

$f_{cm}$	de gemiddelde cilinderdruksterkte van beton op een leeftijd na 28 dagen
$f_{cm0}$	10 MPa
$\beta_{sc}$	de coëfficiënt welke afhankelijk is van het cementtype, voor de waarde van de coëfficiënt geldt:
	4 voor langzaamhardend cement
	5 voor normaal- en snelverhardend cement
	8 voor snelhardend hoge sterkte cement.
$\beta_{RH}$	$= -1,55 \cdot \beta_{sRH}$ voor $40\% \leq RH < 99\%$ $= +0,25$ voor $RH \geq 99\%$

(A.2.31)

met:

$$\beta_{sRH} = 1 - \left( \frac{RH}{RH_0} \right)^3 \quad (\text{A.2.32})$$

Hierin is:

$RH$	de relatieve vochtigheid [%] van de omgeving
$RH_0$	100 %

De ontwikkeling van de krimp in de tijd wordt gegeven door:

$$\beta_s(t - t_s) = \sqrt{\frac{\frac{(t - t_s)}{t_1}}{350 \cdot \left( \frac{h}{h_0} \right)^2 + \frac{(t - t_s)}{t_1}}} \quad (\text{A.2.33})$$

Hierin is:

$h$	de fictieve dikte [mm] volgens vergelijking A.2.14
$t_1$	1 dag
$h_0$	100 mm.

**Temperatuureffecten op krimp**

Indien er een constante temperatuur aanwezig is die ongelijk is aan 20°C, terwijl het beton verhard, moet met de volgende vergelijkingen worden gerekend.

Het effect van de temperatuur in de tijd op de ontwikkeling van krimp wordt met de volgende formule berekend:

$$\alpha_{sT}(T) = 350 \cdot \left( \frac{h}{h_0} \right)^2 \cdot e^{\left[ -0,06 \cdot \left( \frac{T}{T_0} - 20 \right) \right]} \quad (\text{A.2.34})$$

Deze formule vervangt het produkt  $350 \cdot \left( \frac{h}{h_0} \right)^2$  in vergelijking A.2.33.

Het effect van de temperatuur op de theoretische krimp coëfficiënt wordt in de volgende vergelijking weergegeven:

$$\beta_{RH,T} = \beta_{RH} \cdot \beta_{sT} \quad (\text{A.2.35})$$

Hierin is:

$$\beta_{sT} = 1 + \left( \frac{8}{103 - 100 \cdot RH / RH_0} \right) \cdot \left( \frac{T / T_0 - 20}{40} \right) \quad (\text{A.2.36})$$

$\beta_{RH,T}$  een temperatuur afhankelijke coëfficiënt welke  $\beta_{RH}$  vervangt in vergelijking A.2.29.  
 $\beta_{RH}$  de coëfficiënt volgens vergelijking A.2.31



### A.3 Eurocode

De Eurocode, ofwel voluit: "Eurocode 2. Ontwerp en berekening van betonconstructies. Deel 1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen. (NVN-ENV 1992-1-1)." is een zo goed als exacte kopie van de CEB-FIP Model Code 1990. Echter wordt in de Eurocode niet gecorrigeerd op temperatuur zoals dat gebeurt in de MC 90.

De verdere behandeling van de Eurocode zal dan ook buiten beschouwing worden gelaten.

RV %	$k_c$
0 - 60 (droge lucht)	2,6
60 - 85 (buitenlucht)	1,9
85 - 100 (zeer vochtig)	1,4
100 (in water)	1,0

Tabel A.2 De factor  $k_c$  als functie van de relatieve vochtigheid

$t_c$ dagen	$k_d$	
	sterkteklassen 32,5 en 32,5 R	sterkteklassen 42,5 en 42,5 R, 52,5 en 52,5 R
1	1,8	1,7
3	1,6	1,4
7	1,4	1,1
14	1,2	0,9
28	1,0	0,7
90	0,8	0,5
> 365	0,5	0,3

Tabel A.3 De factor  $k_d$  als functie van de ouderdom bij belasten en de sterkteklasse van het cement

$f_{ck}$ $N/mm^2$	$k_b$
15	1,4
25	1,2
35	1,0
45	0,9
55	0,8
65	0,7
> 75	0,6

$h_m$ mm	$k_h$
50	1,20
100	1,00
200	0,85
300	0,75
> 500	0,70

Tabel A.5 De factor  $k_h$  als functie van de fictieve dikteTabel A.4 De factor  $k_b$  als functie van  $f'_{ck}$ 

$f_{ck}$ $N/mm^2$	RV < 60 % (in droge lucht)	60 % < RV < 85 % (in buitenlucht)	85 % < RV < 100 % (zeer vochtig)	RV = 100 % (in water)
15	4,2	3,1	2,3	1,7
25	3,6	2,7	2,0	1,4
35	3,2	2,4	1,8	1,2
45	2,8	2,1	1,5	1,1
55	2,4	1,8	1,3	0,9
65	2,2	1,6	1,2	0,8
> 75	1,9	1,4	1,0	0,7

Tabel A.6 Maximaal aan te houden waarden van de kruipcoëfficiënt  $\phi_{max}$



## A.4 NEN 6720 – VBC 1995

### A.4.1 Algemeen

In deze paragraaf worden de krimp- en kruipformuleringen behandeld zoals deze worden voorgeschreven in de TGB 1990.

#### Toepassingsgebied

De norm is van toepassing voor de sterkteklassen B15 tot en met B65. Voor hogere sterkteklassen kan nadere informatie worden ontleend aan CUR-aanbeveling 37. De gegevens uit de CUR-aanbeveling zijn dan ook verwerkt in de diverse tabellen en formules.

Er bestaat ook een voorstel tot aanpassing van deze CUR-aanbeveling. Deze wordt hier niet behandeld, omdat dit nog geen officiële aanbeveling is.

Ook zijn de aanpassingen volgens de ROBK niet weergegeven. De ROBK zijn de Richtlijnen voor het Ontwerpen van Betonnen Kunstwerken welke opgesteld en gebruikt worden door de Bouwdienst Rijkswaterstaat.

### A.4.2 Kruipvervorming

De kruipvervorming inclusief de elastische vervorming wordt gegeven als:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E'_b} \cdot (1 + \phi) \quad (\text{A.4.1})$$

De representatieve waarde en de rekenwaarde van de kruipcoëfficiënt wordt bepaald uit:

$$\phi = k_c \cdot k_d \cdot k_b \cdot k_h \cdot k_t \leq \phi_{\max} \quad (\text{A.4.2})$$

Hierin is:

- $k_c$  de factor, afhankelijk van de relatieve vochtigheid, zoals aangegeven in Tabel A.2
- $k_d$  de factor, afhankelijk van de ouderdom  $t_e$  van het beton op het tijdstip van belasten en van de sterkteklasse van het cement, zoals aangegeven in Tabel A.3
- $k_b$  de factor, afhankelijk van  $f_{ck}$ , zoals aangegeven in Tabel A.4
- $k_h$  de factor, afhankelijk van de fictieve dikte  $h_m$  van de betondoorsnede, zoals aangegeven in Tabel A.5
- $k_t$  de factor, afhankelijk van de belastingstijd  $t$ , waarvan de waarde volgt uit:

$$k_t = \frac{t}{t + 0,04 \cdot \sqrt{h_m^3}} \quad (\text{A.4.3})$$

Hierin is:

- $t$  de getalwaarde van de belastingstijd in dagen
- $h_m$  de getalwaarde van de fictieve dikte van de betondoorsnede in mm, waarvan de waarde volgt uit:

$$h_m = \frac{2 \cdot A_b}{O_b} \quad (\text{A.4.4})$$

- $\phi_{\max}$  de maximaal aan te houden rekenwaarde van de kruipcoëfficiënt, afhankelijk van  $f_{ck}$  en van de relatieve vochtigheid volgens Tabel A.6.

De representatieve waarde en de rekenwaarde van de elasticiteitsmodulus  $E'_b$  worden bepaald voor een betonsterkteklasse t/m B65 volgens:

$$E'_b = (22250 + 250 \cdot f_{ck}) \quad (\text{A.4.5})$$

En voor een betonsterkte klassen van B65 t/m B105 volgens:

$$E'_b = (35900 + 40 \cdot f_{ck}) \quad (\text{A.4.6})$$

RV %	$\varepsilon'_c$ ‰
0 - 60 (droge lucht)	0,4
60 - 85 (buitenlucht)	0,3
85 - 100 (zeer vochtig)	0,1
100 (in water)	0,0

Tabel A.7 Waarden van de basiskrimp als functie van de relatieve vochtigheid

$h_m$ mm	$k_h$
50	1,20
100	1,05
200	0,80
300	0,65
400	0,55
> 500	0,50

Tabel A.8 De factor  $k_h$  als functie van de fictieve dikte

$f_{ck}$ N/mm <sup>2</sup>	RV < 60 % (in droge lucht)	60 % < RV < 85 % (in buitenlucht)	85 % < RV < 100 % (zeer vochtig)	RV = 100 % (in water)
15	0,54	0,34	0,14	0
25	0,47	0,29	0,12	0
35	0,41	0,26	0,10	0
45	0,36	0,23	0,09	0
55	0,31	0,20	0,08	0
65	0,27	0,18	0,07	0
> 75	0,24	0,15	0,06	0

Tabel A.9 Maximaal aan te houden waarden voor de specifieke krimpverkortings  $\varepsilon'_{max}$ , in ‰



### A.4.3 Krimpvervorming

De representatieve waarde en de rekenwaarde van de specifieke krimpverktorting  $\varepsilon'_r$ , moeten worden bepaald uit:

$$\varepsilon'_r = \varepsilon'_c \cdot k_b \cdot k_h \cdot k_p \cdot k_t < \varepsilon'_{\max} \quad (\text{A.4.7})$$

Hierin is:

$\varepsilon'_c$  de basiskrimp, zoals aangegeven in Tabel A.7

$k_b$  de factor, afhankelijk van  $f'_{ck}$ , zoals aangegeven in tabel Tabel A.4

$k_h$  de factor, afhankelijk van de fictieve dikte  $h_m$  van de betondoorsnede, zoals aangegeven in Tabel A.8

$k_p$  de factor, afhankelijk van het wapeningspercentage, waarvan de waarde volgt uit:

$$k_p = \frac{1}{1 + 0,2 \cdot \omega_o} \quad (\text{A.4.8})$$

Hierin is:

$\omega_o$  het laagste wapeningspercentage van de totale in de doorsnede voorkomende langswapening betrokken op de totale hoogte van de doorsnede.

$k_t$  de factor, afhankelijk van de ouderdom  $t$  van het beton, waarvan de waarde volgt uit formule A.4.3

$\varepsilon'_{\max}$  de maximaal aan te houden rekenwaarde voor de specifieke krimpverktorting, afhankelijk van  $f'_{ck}$  en van de relatieve vochtigheid volgens Tabel A.9.





**Bijlage B**

**De handberekening (Hfdst. 6)**





## B.1 Het invoergedeelte

In deze Bijlage wordt toegelicht hoe de handberekening tot stand gekomen is. Gezien het feit dat er voor dit afstudeeronderwerk redelijk veel handberekeningen gedaan moesten worden, is er op een gegeven moment voor gekozen om dit aan de hand van een spreadsheet te doen. De berekeningen hebben namelijk een repetitief karakter, waarbij vaak slechts kleine wijzigingen doorgevoerd hoeven te worden. Dit is ideaal om uit te laten voeren door Excel. Want door slechts een kleine aanpassing aan de invoer, volgt een volledige handberekening. In deze Bijlage zal de Excel berekening uitgebreid besproken worden, zodat duidelijk wordt hoe de spreadsheet is opgezet. Als eerste zal het Excel werkblad zelf besproken worden, hier wordt door screenshots duidelijk gemaakt welke formules uit Bijlage A zijn toegepast en hoe deze in Excel verwerkt zijn.

Deze screenshots geven gedeelten van de berekening weer, welke zijn toegepast om de uitkragende ligger uit Hoofdstuk 5 te berekenen. De resultaten van de berekening in deze bijlage hebben geleid tot Figuur 5.2.

Voor de duidelijkheid zullen hier nogmaals de gegevens weergegeven worden waarmee de uitkragende ligger in Hoofdstuk 5, en specifiek in Figuur 5.2 berekend zijn:

Eigen gewicht:	0 kg/m <sup>3</sup>
Betonkwaliteit:	B 45
Afmetingen:	0,25 x 0,25 x 1,0 m.
Relatieve vochtigheid:	75 % (constant, oftewel geen amplitude)
Omgevingstemperatuur:	10,4 °C (constant)
Tijdstip van storten:	0 dagen.
Tijdstip van ontkisten:	14 dagen
Tijdstip van belasten:	56 dagen t/m 10.000 dagen.
Belasting:	Normaalkracht 1500 kN ( $\sigma = 24 \text{ N/mm}^2$ )
Oplegging:	Volledige inklemming (van $t = 0$ t/m $t = 10.000$ dagen)

In Bijlage A, was al te zien dat de CEB-FIP Model Code 1978 bestaat uit verschillende figuren en tabellen. Indien er gerekend wordt volgens dit voorschrift dienen waarden uit deze figuren en tabellen afgelezen te worden. Omdat dit niet door een spreadsheet gedaan kan worden, is gebruik gemaakt van de formules. Deze formules zijn ook in Bijlage A gegeven.

De Model Code 1990 bestaat geheel uit formules, dus dit voorschrift is ook zonder problemen in de spreadsheet in te voeren. De VBC (met aanvulling van de CUR-aanbeveling) is wat lastiger. De krimp- en kruip-formuleringen volgens dit voorschrift bestaan grotendeels uit tabellen. Tabellen zijn door een spreadsheet slecht af te lezen, laat staan te interpoleren tussen waarden uit de tabel. Er is voor gekozen om de meeste tabellen in Excel in te voeren met *Als*-functies. Hoe een dergelijke functie is opgesteld zal in deze bijlage duidelijk worden. Indien een tabel niet in een *Als*-functie te vangen was, doordat er geïnterpoleerd moet worden tussen waarden in de tabel, is een andere oplossing gekozen. Dan moet namelijk handmatig geïnterpoleerd worden en moet het resultaat zelfstandig ingevoerd worden.

Zoals gezegd zijn er veel verschillende berekeningen uitgevoerd met het Excel werkblad, welke de handberekening vervangt. In elke berekening dienen uitgangsparameters gekozen te worden. Uitgangsparameters zijn bijvoorbeeld de temperatuur, de fictieve dikte of de relatieve vochtigheid. Om nu niet bij elke berekening kriskras in de spreadsheet deze waarden aan te hoeven passen, is gekozen om deze waarden centraal neer te zetten. Dit is te zien in de figuur op de volgende pagina. Deze figuur geeft het invoergedeelte van de berekening weer.

In de figuur is dus het invoergedeelte te zien. De grijs gekleurde cellen geven aan dat op de betreffende plekken een invoer wordt verwacht. De grijze cellen zijn de enige cellen waar handmatige invoer verwacht wordt voor de hele spreadsheet.

In de linkerbovenhoek wordt achtereenvolgens invoer verwacht, met betrekking tot:

- RV De relatieve vochtigheid
- h De fictieve dikte van de constructie
- t<sub>0</sub> Het tijdstip waarop de belasting wordt aangebracht. Hierin is t<sub>0</sub>, het aantal dagen na het storten van de constructie.
- B De betonklasse van het gebruikte materiaal.

Iets daaronder is het tijdstip van ontkisten in dagen (na storten) weergegeven.



uitkragende ligger

RV 75 % Constante temp na belasten: (MC's) 10.4 °C  
h 125 mm

t0 56 dagen Cementtype (MC's): I  
B 45

onkisten 14 dagen

MC 78 / MC90 Temp. voor belasten: 10.4 °C VBC kd 0.91  
Temp. voor belasten: 10.4 °C ^zie tabel >> wo 2 min. Wappercentage

krimp: es1: -0.000273

	RV	es1
100%		+0.00010
90%		-0.00013
70%		-0.00032
40%		-0.00052

spanning 24 N/mm2

t0	kd	
dagen	32.5	45.25 + 52.5
1	1.8	1.7
3	1.6	1.4
7	1.4	1.1
14	1.2	0.9
28	1.0	0.7
90	0.8	0.5
> 365	0.5	0.3

fck,cyl 36.15 fck,cub = 45

fck,cyl	12	20	30	40	50	60	70	80
fck,cub	15	25	37	50	60	70	80	90

Fig. B.1 Het invoergedeelte van het Excel-werkblad

Middenboven wordt de 'constante temp. na belasten' gevraagd. In de Model Code 1990 wordt onderscheid gemaakt tussen de temperatuur voor en na belasten van beton. De temperatuur voor belasten is van belang in Formule A.2.17, en de temperatuur na belasten speelt een rol indien deze afwijkt van de 20°C en wordt in Formule A.2.22, A.2.24 en A.2.27 gebruikt. Indien de temperatuur naar boven afwijkt (dus hoger als 20°C) moet ook de temperatuur na belasten gebruikt worden in Formule A.2.26.

In principe wijken de temperaturen voor en na belasten niet af (temperatuur verhogingen door verharding uitgesloten).

Ook moet het cementtype opgegeven worden. In de Model Code's wordt dit cementtype met regelmaat gebruikt, echter veelal met een ander uitgangspunt. Normaal en langzaam hardend cement hoeft dus niet altijd de coëfficiënt 1 te zijn. Dit is met *Als*-functies in de spreadsheet ondervangen.

Aan de linkerkzijde, achter het kopje 'krimp:es1' wordt een handmatige invoer verwacht. Hier moet geïnterpoleerd worden aan de hand van een tabel. Aangezien dit nogal lastig is om door de spreadsheet te laten doen, moet dit handmatig opgegeven worden. Deze coëfficiënt es1 ( $\epsilon_{s1}$ ) wordt in de Model Code 78 gebruikt om de krimp te berekenen.

Daaronder, in de linker onderhoek, wordt een handmatige invoer voor fck,cyl verwacht. Dit is de karakteristieke cilinderdruksterkte die moet worden geïnterpoleerd uit een tabel. Het op deze manier omrekenen van de kubusdruksterkte wordt toegepast in de Model Code 90.

Onder het kopje 'VBC', wordt een handmatige invoer verwacht voor kd. De waarde kd wordt zowel bij de krimp- als bij de kruipberekening toegepast. Ook omdat hier geïnterpoleerd dient te worden, is handmatige invoer gewenst.

Daaronder wordt het minimum wapeningspercentage gevraagd, welke de VBC gebruikt in haar krimpmodellering.

Als laatste dient de op de constructie aangebrachte spanning ingevoerd te worden. Deze wordt vanzelfsprekend gebruikt voor de vervorming ten gevolge van krimp en voor de elastische vervorming.



## B.2 Kruipberekening

Nu de invoer gereed is, kan met de berekening gestart worden. Voor de eenvoud is de berekening gesplitst in een kruipdeel en een krimpdeel. Als eerste zal de kruipberekening aan de hand van de drie voorschriften worden toegelicht. In Bijlage B.3 zal dan de krimpberekening aan de orde komen.

In Bijlage B.4 wordt de berekening met formules uitgeschreven. Daar zijn dezelfde waarden terug te vinden als de waarden die naar voren komen in deze paragraaf. In Bijlage B.4 zullen de krimp en kruip echter maar op één tijdstip berekend worden, namelijk 10.000 dagen.

In deze paragraaf zullen de in de figuren gebruikte factoren en coëfficiënten toegelicht worden, en is weergegeven met welke formules deze berekend zijn. In Bijlage B.4 zijn deze coëfficiënten en factoren ook terug te vinden, daar echter met de formules uitgeschreven en ingevuld. Hierdoor kan een goede controle plaatsvinden.

### B.2.1 De Model Code 1978

Het is bekend dat de Model Code 1978 werkt met figuren en tabellen waaruit waarden afgelezen dienen te worden. Dat dit in een spreadsheet onmogelijk is, moge duidelijk zijn. Er is een andere afstudeerder geweest die ook eens met de Model Code 1978 heeft gewerkt, en er onderzoek naar gedaan heeft. Door hem zijn formules gevonden die de figuren en tabellen binnen de MC78 vervangen. Deze formules zijn ook in Bijlage A terug te vinden en zijn binnen deze spreadsheet gebruikt om te kunnen rekenen. In Bijlage B.4 waar de berekening is uitgeschreven zijn de figuren en tabellen uit de Model Code 78 gebruikt. Er zullen daartoe enige verschillen te zien zijn, in de hier berekende waarden en de waarden in Bijlage B.4. Deze verschillen zijn echter klein, en er is door de betreffende afstudeerder een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd naar de consequenties van deze verschillen. Door hem is geconcludeerd dat de uiteindelijke verschillen in de totale krimp en kruip marginaal waren, de gemaakte fouten bleken elkaar grotendeels op te heffen.

Om nu toch zeker te zijn, dat de deze spreadsheet geen fouten geslopen zijn, is er een controle uitgevoerd. Deze controle heeft plaatsgevonden met de formules die ook in de spreadsheet gebruikt zijn. Deze controle is niet in dit verslag terug te vinden, omdat het anders te onoverzichtelijk zou worden. Er is namelijk al een volledig uitgeschreven handberekening aanwezig die ook de uitkomsten van deze spreadsheet controleert.

		tc	0,68 *t	f <sub>cm</sub> (28)	42,4
		ba(t0,c)	0,1840	Ec(28)	33127
		fd	0,4	Ec(t0)	34170
		ff	2,5858	ff1	1,6432
				ff2	1,5737
		df	222,222	l	1,7778
				af	4,453E-03
		bf(t0,c)	0,4415	bf	0,3892
MC78					
t	kromme	functie	tc	tc-t0,c	bd(tc-t0,c) bf(tc)
81	#GETAL!	#GETAL!	55	-1	#GETAL! 0,4394
83	9,2280	0,3043	56	0	0,2943 0,4425
88	9,5010	0,3419	60	4	0,3403 0,4499
95	9,8073	0,3842	65	9	0,3824 0,4598
100	10,0031	0,4112	68	12	0,4068 0,4664
125	10,8222	0,5243	85	29	0,4984 0,4960
150	11,4730	0,6141	102	46	0,5629 0,5208
200	12,4788	0,7530	136	80	0,6514 0,5608
250	13,2412	0,8582	170	114	0,7103 0,5923
300	13,8513	0,9424	204	148	0,7525 0,6184
400	14,7875	1,0716	272	216	0,8095 0,6595
500	15,4888	1,1684	340	284	0,8466 0,6912
1000	17,4960	1,4455	680	624	0,9303 0,7854
1250	18,0757	1,5255	850	794	0,9496 0,8134
1500	18,5212	1,5870	1020	964	0,9633 0,8351
2000	19,1681	1,6763	1360	1304	0,9815 0,8668
2500	19,6195	1,7386	1700	1644	0,9933 0,8890
3000	19,9542	1,7848	2040	1984	1,0017 0,9056
4000	20,4182	1,8488	2720	2664	1,0130 0,9286
5000	20,7242	1,8911	3400	3344	1,0203 0,9438
6000	20,9401	1,9209	4080	4024	1,0255 0,9545
7000	21,0997	1,9429	4760	4704	1,0295 0,9624
8000	21,2216	1,9597	5440	5384	1,0325 0,9685
9000	21,3172	1,9729	6120	6064	1,0350 0,9732
10000	21,3938	1,9835	6800	6744	1,0371 0,9770
14706	21,6097	2,0133	10000	9944	1,0436 0,9875

Fig. B.2 MC78-resultaten voor de kruipberekening

De bovenstaande figuur is in werkelijkheid veel uitgebreider wat betreft het tijdsverloop. Dat is hier niet weergegeven om zo de figuur nog enigszins overzichtelijk over te laten komen. Wat wel is weergegeven zijn alle factoren waarmee de kruipvervorming wordt berekend. Deze zijn op de volgende pagina toegelicht.

De factoren die terug te vinden zijn in Fig. B.2. :

- $t_c$   $t_c$ , de vermenigvuldigingsfactor voor de gecorrigeerde ouderdom, volgens formule A.1.7.  $\alpha_c$  en  $T(t)$  hierin, zijn volgens Fig. B.1.
- $ba(t_0, c)$   $\beta_a(t_{0,c})$ , de waarde volgens formule A.1.8, met  $t_0$  volgens Fig. B.1.
- $fd$   $\phi_d$ , een vaste waarde van 0,4.
- $ff$   $\phi_f$ , het product van  $\phi_{f1}$  en  $\phi_{f2}$ .
- $ff1$   $\phi_{f1}$ , volgens formule A.1.10. Dit is ook de coëfficiënt die in het materialen-bestand van Bridges wordt gebruikt.
- $ff2$   $\phi_{f2}$ , volgens formule A.1.11. In deze formule wordt de factor  $d_f$  gebruikt.
- $df$   $d_f$ , de fictieve dikte volgens formule A.1.15. Om deze waarde te bepalen is de dikte uit Fig. B.1 en de  $\lambda$ -waarde benodigd.
- $l$  de  $\lambda$ -waarde volgens formule A.1.16.
- $bf(t_0, c)$   $\beta_f(t_{0,c})$ , de waarde volgens formule A.1.12. Voor deze formule zijn de waarden  $A_f$  (af) en  $B_f$  (bf) nodig, deze worden bepaald aan de hand van formules A.1.13 en A.1.14.
- $bf(tc)$   $\beta_f(t_c)$ , de tijdsafhankelijke waarde, die ook volgens formule A.1.12 wordt bepaald.
- $bd(tc-t_0, c)$   $\beta_d(t_c-t_{0,c})$ , de waarde volgens formule A.1.9, hiervoor is de waarde  $t_c-t_{0,c}$  van belang.

In de kolom *functie* wordt de kruipfactor  $\phi(t, t_0)$  weergegeven.

En in de kolom *kromme* wordt de kruipvervorming  $\varepsilon_{cr}(t, t_0)$  weergegeven, volgens vergelijking A.1.5.

Hiervoor wordt nog het volgende bepaald:

- $\sigma_0$  de spanning volgens Fig. B.1.
- $E_c(28)$   $E_c(28)$ , de elasticiteitsmodulus volgens formule A.1.3.
- $E_c(t_0)$   $E_c(t_0)$ , de elasticiteitsmodulus in de tijd volgens formule A.1.4.

In de Model Code's is de elastische vervorming een onderdeel van de kruipformulering.

## B.2.2 De Model Code 1990

In navolging op de Model Code 1978 zal hier de kruipformulering volgens de Model Code 1990 worden gegeven. Ook voor de MC90 geldt dat er een uitgeschreven controle berekening terug te vinden is in Bijlage B.4.

Op de volgende pagina is een de figuur te zien, waarin de kruip wordt berekend volgens de MC90.

De factoren waarmee de kruipvervorming wordt berekend zijn hieronder weergegeven:

De kruipkromme is de kruipvervorming volgens A.2.6, hierin zijn van belang:

- $\sigma_c(t_0)$ , deze is al vermeld in Fig. B.1.
- $E_c(t_0)$ , volgens formule A.2.7.
- $E_{ci}$ , volgens formule A.2.3.
- $\phi(t, t_0)$ , de waarden in de kolom 'functie', volgens formule A.2.9 en verder.

Voor de genoemde formulering van de kruipcoëfficiënt ( $\phi(t, t_0)$ ), zijn verschillende factoren van belang. Deze zijn in Figuur B.3. Deze factoren zullen hieronder worden toegelicht.

- De factoren  $RH_0$  ( $RH_0$ ),  $h_0$  ( $h_0$ ),  $t_1$  ( $t_1$ ) en  $f_{cm0}$  ( $f_{cm0}$ ), zijn allen factoren met een vaste, gegeven waarden die in de diverse formules naar voren komen.

Hun tegenhangers die in dezelfde formules genoemd worden, zijn variabelen, te weten:

- $RH$ , vernoemd in Fig. B.1
- $h$ , de fictieve dikte, ook uit Fig. B.1
- $t$ , het tijdsverloop, te vinden in de nevenstaande figuur.
- $t_0$ , het belastingtijdstip uit Fig. B.1.
- $f_{cm}$ , zie hieronder.
- $f_{cm}$ ,  $f_{cm}$  volgens formule A.2.4.
- $\phi_{RH}$ ,  $\phi_{RH}$  bepaald volgens A.2.11.
- $b(f_{cm})$ ,  $\beta(f_{cm})$ , volgens formule A.2.12.
- $b(t_0)$ ,  $\beta(t_0)$ , volgens formule A.2.13.
- $f_0$ ,  $\phi_0$ , als product van de bovengenoemde drie, volgens A.2.10.
- $bh$ ,  $\beta_h$ , volgens formule A.2.16
- $bc(t-t_0)$   $\beta_c(t-t_0)$ , de tijdsafhankelijke formulering gegeven in een nevenstaande kolom.



Voor de Elasticiteits-modulus formuleringen zijn de factoren rechtsboven van belang. Deze zijn berekend volgens formule A.2.3 t/m A.2.5.

Voor de toegepaste gecorrigeerde ouderdom worden de volgende factoren gebruikt:

- $T_0$   $T_0$ , met als vaste waarde van  $1^\circ\text{C}$ , toegepast in formule A.2.17 en A.2.18.
- $t_{1,T}$   $t_{1,T}$ , met een vaste waarden van 1 dag, toegepast in formule A.2.18.
- $t_0$   $t_0$ , het gecorrigeerde tijdstip van belasten volgens A.2.18.
- $t_{0,T}$   $t_{0,T}$ , volgens formule A.2.17

Voor de toegepaste invloed van de temperatuureffecten worden de volgende factoren gebruikt:

- $T_0$   $T_0$ , met als vaste waarde van  $1^\circ\text{C}$ , toegepast in formule A.2.22, A.2.24 en A.2.26.
- $dfT,trans$   $\Delta\phi_{T,trans}$  volgens formule A.2.26. Deze waarde wordt alleen toegepast indien de constructie wordt belast bij een temperatuur boven  $20^\circ\text{C}$ .
- $bT$   $\beta_T$  volgens formule A.2.22.
- $bh,t$   $\beta_{H,t}$  volgens formule A.2.21, welke de factor  $\beta_h$  (zie hierboven) vervangt in de kruipvervorming
- $ft$   $\phi_t$ , volgens formule A.2.24
- $frh,t$   $\phi_{RH,T}$ , volgens A.2.23, welke de factor  $\phi_{RH}$  (zie hierboven) vervangt.

De kolom ' $t - t_{0,c} + t_0$ ' representeert de gecorrigeerde tijdstippen.

RH0	100			
h0	100	fcm	44,15	
t1	1	s	0,25	
fcm0	10	Eci(T)	36287	
		Eci	35271	
frh	1,5045	bcc^(1/2)(	1,0373	
b(fcm)	2,5224	Ec(t0,T)	37640	
b(t0)	0,4676	Ec(t0)	36586	
f0	1,5220			
bh	465,6427			
		t0,t	35,2	
T0	1	bt	1,1887	
t1,T	1	bh,t	553,5	
t0	35,1993	ft	0,8659	
dfT,trans	0,0369	frh,t	1,2903	
MC90				
bc(t-t0)	functie	kromme	t-t0,c+t0	t
#GETAL!	#GETAL!	#GETAL!	40,8	20
#GETAL!	#GETAL!	#GETAL!	50,8	30
#GETAL!	#GETAL!	#GETAL!	55,8	35
0,1406	0,2140	7,7914	56,8	36
0,2401	0,3654	8,7928	60,8	40
0,2966	0,4514	9,3618	65,8	45
0,3347	0,5095	9,7459	70,8	50
0,4446	0,6767	10,8519	95,8	75
0,5083	0,7736	11,4929	120,8	100
0,5539	0,8431	11,9524	145,8	125
0,5895	0,8972	12,3105	170,8	150
0,6185	0,9414	12,6028	195,8	175
0,6430	0,9786	12,8487	220,8	200
0,7129	1,0850	13,5521	320,8	300
0,7581	1,1538	14,0075	420,8	400
0,7903	1,2029	14,3322	520,8	500
0,8420	1,2814	14,8517	770,8	750
0,8728	1,3284	15,1624	1020,8	1000
0,8935	1,3599	15,3704	1270,8	1250
0,9083	1,3824	15,5197	1520,8	1500
0,9282	1,4128	15,7203	2020,8	2000
0,9499	1,4458	15,9388	3020,8	3000
0,9616	1,4635	16,0556	4020,8	4000
0,9688	1,4745	16,1285	5020,8	5000
0,9839	1,4975	16,2804	10000,8	9980
0,9839	1,4975	16,2807	10020,8	10000

Fig. B.3 MC90 resultaten voor de kruip-berekening

### B.2.3 De VBC

Als laatste voorschrift wordt de VBC besproken met betrekking tot de kruip. De VBC scheidt in eerste instantie de elastische vervorming en de kruipvervorming. Vanwege het feit dat bij de andere twee voorschriften deze scheiding niet van toepassing is, is hier ook meteen de elastische vervorming meegenomen.

De kruipvervorming (incl. elastische vervorming), te zien in de kolom *kromme*, wordt berekend volgens formule A.4.1. Hierin worden de volgende factoren gebruikt:

- $\sigma$ , ingevoerd in het invoergeedeelte, zie Fig. B.1.
- $E'b$ , berekend volgens formule A.4.5 of A.4.6.
- $\phi$ , de kruipcoëfficiënt, terug te vinden in de kolom 'functie'.

De kruipcoëfficiënt is een product van de volgende factoren:

- $k_c$ , deze waarde, zie Tabel A.2, is door een *ALS*-functie in de Excel-spreadsheet ingevoerd.
- $k_d$ , deze factor wordt handmatig in het invoergeedeelte ingevoerd.
- $k_b$ , deze factor wordt ook door een *ALS*-functie ingevoerd volgens Tabel A.4
- $k_h$ , hiervoor geldt hetzelfde.
- $k_t$ , een in de tijd variërende factor volgens formule A.4.3

Deze kruipcoëfficiënt mag niet groter zijn dan  $\phi_{\max}$  ( $f_{\max}$ ), en wordt ook door middel van een *ALS*-functie bepaald volgens Tabel A.6.

E'b	33500		
kc	1,9		
kb	0,9		
kh	0,963		
fmax	2,1		
VBC			
kt	functie	kromme	t
0	0	0,7164	55
0	0	0,7164	56
0,0176	0,0263	0,7353	57
0,0668	0,1001	0,7881	60
0,1387	0,2078	0,8653	65
0,2003	0,3001	0,9314	70
0,2537	0,3801	0,9887	75
0,4404	0,6600	1,1893	100
0,5524	0,8278	1,3095	125
0,6271	0,9397	1,3896	150
0,6804	1,0196	1,4469	175
0,7204	1,0795	1,4898	200
0,8136	1,2192	1,5899	300
0,8602	1,2890	1,6399	400
0,8882	1,3310	1,6699	500
0,9255	1,3868	1,7100	750
0,9441	1,4147	1,7300	1000
0,9627	1,4427	1,7500	1500
0,9720	1,4566	1,7600	2000
0,9776	1,4650	1,7660	2500
0,9814	1,4706	1,7700	3000
0,9860	1,4776	1,7750	4000
0,9888	1,4818	1,7780	5000
0,9907	1,4846	1,7800	6000
0,9920	1,4866	1,7814	7000
0,9944	1,4901	1,7840	10000

Fig. B.4 De VBC resultaten voor de kruipberekening

Zoals eerder toegezegd zal het principe van een gebruikte *Als*-functie worden toegelicht. Een dergelijk concept is misschien niet bij iedereen bekend, maar is wel essentieel indien vertrouwd moet worden op de hier toegepaste Excel-berekening. Daarvoor zal de gebruikte *Als*-functie voor de factor  $k_b$  worden uitgeschreven.

De factor  $k_b$  wordt in de VBC volgens de volgende tabel (Tabel A.4. uit Bijlage A) bepaald. Zoals bekend is de CUR aanbeveling voor hogesterktebeton toegevoegd aan de formuleringen volgens de VBC.

De waarde voor  $f_{ck}$  is bekend volgens Fig. B.1.

De *Als*-functie die gebruikt is in de spreadsheet en dus in Fig. B.4. is:

$=+ALS(D12=35;1;ALS(D12=45;0,9;ALS(D12=55;0,8;ALS(D12=65;0,7;ALS(D12>65;0,6))))$

De cel D12 geeft de B-waarde weer.

De formule komt op het volgende neer: Als het B35 betreft is  $k_b$  gelijk aan 1, anders is  $k_b$  als het B45 betreft gelijk aan 0,9, ..... , anders is  $k_b$  als de B-waarde hoger is dan 65 gelijk aan 0,6. Indien er een B-waarde van bijvoorbeeld 25 of 36 wordt opgegeven, dan zal de formule een foutmelding geven.

$f_{ck}$ N/mm <sup>2</sup>	$k_b$
15	1,4
25	1,2
35	1,0
45	0,9
55	0,8
65	0,7
> 75	0,6



### B.3 Krimpberekening

Na de bespreking van de kruipberekening, volgt nu de krimpberekening. De voorschriften zullen in dezelfde volgorde besproken worden, te weten eerst de Model Code 1978 dan de MC90 en als laatste de VBC.

#### B.3.1 De Model Code 1978

Net als bij de kruipberekening geldt ook hier dat bij de formuleringen in de Model Code 1978 grafieken en tabellen gebruikt worden. In de spreadsheet zijn deze vervangen door formules.

De factoren waarmee de krimpvervorming wordt berekend in de nevenstaande figuur, zijn:

- $l$   $\lambda$ , de waarde waarmee de fictieve dikte vermenigvuldigd wordt.  $\lambda$  komt terug in de formulering van  $d_f$ .
- $df$   $d_f$ , de fictieve dikte.
- $es2$   $\epsilon_{s2}$ , de waarde volgens formule A.1.18.  
De waarde  $\epsilon_{s1}$ , is bepaald in Fig. C.1.
- $As$   $A_s$ , deze factor wordt toegepast in de formuleringen van  $\beta_s$ .  
 $A_s$  wordt bepaald volgens formule A.1.20.
- $Bs$   $B_s$ , wordt ook toegepast in  $\beta_s$  en wordt bepaald met A.1.21.
- $bs(t_0)$   $\beta_s(t_0)$ , berekend volgens formule A.1.19 met als waarde van  $t_0$ , het tijdstip van ontkisten volgens Fig. C.1. (niet te verwarren met  $t_0$  als het tijdstip van belasten!).
- $bs(t)$   $\beta_s(t)$ , ook berekend volgens formule A.1.19, met  $t$  het verloop in de tijd.
- $es(t, t_0)$   $\epsilon_s(t, t_0)$ , de uiteindelijke krimpvervorming, volgens formule A.1.17.

l	1,7778	
df	222,22	
es2	9,2648E-01	
As	2,9006E-03	
Bs	5,6843E-01	
bs(t0)	1,4942E-01	
MC78		
bs(t)	es(t,t0)	t
0,14942	0,0000E+00	14
0,15491	-1,3856E-06	15
0,16021	-2,7232E-06	16
0,16534	-4,0172E-06	17
0,17981	-7,6710E-06	20
0,20150	-1,3148E-05	25
0,22088	-1,8041E-05	30
0,28372	-3,3906E-05	50
0,34307	-4,8890E-05	75
0,39033	-6,0820E-05	100
0,46372	-7,9349E-05	150
0,51991	-9,3536E-05	200
0,56527	-1,0499E-04	250
0,70925	-1,4134E-04	500
0,83988	-1,7432E-04	1000
0,90041	-1,8960E-04	1500
0,93389	-1,9805E-04	2000
0,96731	-2,0649E-04	3000
0,98220	-2,1025E-04	4000
0,98967	-2,1214E-04	5000
0,99684	-2,1395E-04	7500
0,99887	-2,1446E-04	10000

Fig. B.5 MC78 resultaten voor de krimpberekening



### B.3.2 De Model Code 1990

In de hiernaast staande figuur wordt de krimpvervorming berekend aan de hand van de Model Code 1990.

De factoren waarmee de krimpvervorming in deze spreadsheet wordt berekend zijn de volgende:

- $t_s$   $t_s$ , het tijdstip van ontkisten, bepaald in Fig. B.1.  $t_s$  wordt in de formules A.2.28 en A.2.23 gebruikt.
- $t_1$   $t_1$ , is wordt gebruikt als eenheids-tijdstip en is gelijk gesteld aan 1 dag.
- $h_0$   $h_0$ , wordt gebruikt als eenheidsdikte en is gelijk aan 100 mm.
- $\epsilon_{cs0}$   $\epsilon_{cs0}$ , is de basiskrimpcoëfficiënt die wordt berekend in formule A.2.29.
- $\beta_{rh}$   $\beta_{rh}$ , is een coëfficiënt die wordt bepaald volgens formule A.2.31 en wordt gebruikt in de bepaling van  $\epsilon_{cs0}$ .
- $\epsilon_s(f_{cm})$   $\epsilon_s(f_{cm})$ , de waarde die wordt bepaald volgens A.2.29 en ook wordt gebruikt voor de bepaling van  $\epsilon_{cs0}$ .
- $\beta_{sc}$   $\beta_{sc}$ , een coëfficiënt voor de berekening van  $\epsilon_s(f_{cm})$  en wordt bepaald volgens een Als-functie, met uitgangspunt de cement-coëfficiënt uit Fig. B.1.
- $f_{cm0}$   $f_{cm0}$ , een eenheidscoëfficiënt met als waarde 10 MPa.
- $f_{cm}$   $f_{cm}$ , de gemiddelde 28 daagse cylinderdruksterkte, bepaald in Fig. B.1.

De volgende waarden (rechtsboven) zijn bepaald om de temperatuurseffecten op krimp in rekening te brengen. Dit zijn de effecten die doorgaans niet meegenomen worden in een berekening. Zie hiervoor ook Hoofdstuk 4.4, waar onderzocht wordt welke invloed het heeft of deze effecten wel of niet worden meegenomen. Het temperatuurseffect wordt bepaald volgens de volgende coëfficiënten:

- $\epsilon_{cs0}(T)$   $\epsilon_{cs0}(T)$ , de coëfficiënt  $\epsilon_{cs0}$  opnieuw berekend voor de verandering van andere coëfficiënten.
- $\beta_{RH,T}$   $\beta_{RH,T}$ , de waarde volgens formule A.2.35.
- $\beta_{s,T}$   $\beta_{s,T}$ , de waarde volgens formule A.2.36
- $\alpha_{st}(T)$   $\alpha_{st}(T)$ , de waarde volgens formule A.2.34.

Vervolgens is er nog een tijdsafhankelijke factor  $\beta_s(t-t_s)$ . Deze is twee maal bepaald. Eén maal zonder correctie op de temperatuurseffecten, en één maal met correctie ( $\beta_s(t-t_s)(T)$ )

Ook de daadwerkelijke krimpvervorming  $\epsilon_{cs}(t,t_s)$ , is twee maal bepaald, ook eenmaal zonder correctie ( $\epsilon_{cs}(t,t_s)$ ) en eenmaal met correctie ( $\epsilon_{cs}(t,t_s)(T)$ ).

$t_s$	14			
$t_1$	1			
$h_0$	100			
$\epsilon_{cs0}$	-3,4880E-04			
$\beta_{rh}$	-0,8961			
$\epsilon_s(f_{cm})$	3,8925E-04	$\epsilon_{cs0}(T)$	-3,2489E-04	
$\beta_{sc}$	5	$\beta_{RH,T}$	-0,8346	
$f_{cm0}$	10	$\beta_{s,T}$	0,9314	
$f_{cm}$	44,15	$\alpha_{st}(T)$	972,8406	
MC90				
$\epsilon_{cs}(t,t_s)$	$\beta_s(t-t_s)$	$\beta_s(t-t_s)(T)$	$\epsilon_{cs}(t,t_s)(T)$	$t$
#GETAL!	#GETAL!	#GETAL!	#GETAL!	10
0	0	0	0	14
-1,4902E-05	0,0427	0,0320	-1,0411E-05	15
-3,6337E-05	0,1042	0,0783	-2,5436E-05	20
-4,8979E-05	0,1404	0,1057	-3,4353E-05	25
-5,8808E-05	0,1686	0,1272	-4,1326E-05	30
-7,4309E-05	0,2130	0,1613	-5,2417E-05	40
-8,6685E-05	0,2485	0,1889	-6,1372E-05	50
-9,7158E-05	0,2785	0,2125	-6,9033E-05	60
-1,1049E-04	0,3168	0,2429	-7,8917E-05	75
-1,2858E-04	0,3686	0,2850	-9,2590E-05	100
-1,4328E-04	0,4108	0,3200	-1,0397E-04	125
-1,5566E-04	0,4463	0,3502	-1,1378E-04	150
-1,6635E-04	0,4769	0,3768	-1,2242E-04	175
-1,7572E-04	0,5038	0,4006	-1,3016E-04	200
-2,0440E-04	0,5860	0,4766	-1,5486E-04	300
-2,2437E-04	0,6433	0,5330	-1,7316E-04	400
-2,3926E-04	0,6860	0,5772	-1,8752E-04	500
-2,6420E-04	0,7574	0,6563	-2,1322E-04	750
-2,7975E-04	0,8020	0,7095	-2,3050E-04	1000
-2,9822E-04	0,8550	0,7774	-2,5257E-04	1500
-3,0886E-04	0,8855	0,8193	-2,6617E-04	2000
-3,1580E-04	0,9054	0,8478	-2,7543E-04	2500
-3,3112E-04	0,9493	0,9147	-2,9718E-04	5000
-3,3672E-04	0,9654	0,9407	-3,0563E-04	7500
-3,3963E-04	0,9737	0,9546	-3,1013E-04	10000

Fig. B.6 MC90 resultaten voor de krimpberekening

### B.3.3 De VBC

Als laatste in het rijtje, is hier de krimpvervorming volgens de VBC terug te vinden. De krimpvervorming is een eenvoudige vermenigvuldiging van diverse factoren. De factoren zijn grotendeels bepaald volgens *Als*-functies. In nevenstaande figuur is  $e'r$  de krimpvervorming. Hierin zijn  $e'c$ ,  $kb$ ,  $kh$ ,  $kp$  en  $kt$  factoren, waarbij  $kt$  een tijdsafhankelijk factor is. De voorwaarde dat  $e'r$  niet groter mag zijn dan  $e'max$  is hier verwerkt met een *Als*-functie.

$e'c$	0,25	
$kb$	0,9	
$kh$	0,9880	
$kp$	0,7143	
$e'max$	0,23	
VBC		
$e'r$	$kt$	$t$
2,7905E-06	0,0176	1
5,4847E-06	0,0345	2
8,0873E-06	0,0509	3
1,0603E-05	0,0668	4
1,3036E-05	0,0821	5
2,4094E-05	0,1517	10
3,3593E-05	0,2116	15
4,1840E-05	0,2635	20
4,9067E-05	0,3090	25
7,4968E-05	0,4721	50
9,0976E-05	0,5729	75
1,0185E-04	0,6414	100
1,0972E-04	0,6910	125
1,1568E-04	0,7285	150
1,2410E-04	0,7816	200
1,2977E-04	0,8173	250
1,4282E-04	0,8994	500
1,4777E-04	0,9306	750
1,5038E-04	0,9471	1000
1,5199E-04	0,9572	1250
1,5308E-04	0,9641	1500
1,5447E-04	0,9728	2000
1,5531E-04	0,9781	2500
1,5703E-04	0,9889	5000
1,5761E-04	0,9926	7500
1,5790E-04	0,9944	10000

Fig. B.7 VBC resultaten voor de kripmberekening



## B.4 Rekenvoorbeeld

In deze paragraaf zal de handberekening daadwerkelijk handmatig worden uitgevoerd. Dit gebeurt aan de hand van de drie voorschriften en geldt als controle op de Excel berekening uit de vorige paragraaf. Alle in Excel gebruikte factoren zijn hier ook terug te vinden. Er wordt logischerwijs van het zelfde uitgangspunt uitgegaan, namelijk de uitkragende ligger uit Hoofdstuk 5, waarvan de resultaten te vinden zijn in Figuur 5.2.

Met de spreadsheet is het heel gemakkelijk om bij de krimp en kruipberekening een groot aantal tijdstippen door te rekenen. Met de hand is dit echter veel meer werk. Vandaar dat hier alleen de eindwaarden worden bepaald, namelijk de waarden op  $t = 10.000$  dagen.

Als eerste zal de kruipberekening besproken worden, daarna de krimpberekening. Vervolgens zullen de waarden uit beide berekeningen gesommeerd worden en worden ze vergeleken worden met de resultaten uit Figuur 5.2. Deze figuur is namelijk het resultaat van de Excel berekening.

### B.4.1 Kruip

#### B.4.1.1 Model Code 1978

De kruipvervorming wordt berekend volgens formule A.1.5, ofwel de volgende vergelijking:

$$\varepsilon_{\text{cr}}(t, t_0) = \sigma_0 \cdot \left[ \frac{1}{E_c(t_0)} + \frac{\varphi(t, t_0)}{E_c(28)} \right] = \sigma_0 \cdot J(t, t_0)$$

Hierin is  $\sigma_0$ , de belasting van 1500 kN op het betonoppervlak, omgerekend: 24 N/mm<sup>2</sup>.

Verder is  $J(t, t_0)$  de functie volgens formule A.1.6:

$$J(t, t_0) = \frac{1}{E_c(t_{0,c})} + \frac{\beta_a(t_{0,c})}{E_{c,28}} + \frac{\varphi_d \cdot \beta_d(t_c - t_{0,c})}{E_{c,28}} + \frac{\varphi_f \cdot (\beta_f(t_c) - \beta_f(t_{0,c}))}{E_{c,28}}$$

Hieronder zullen de factoren puntsgewijs worden genoemd en berekend:

- $E_{c,28} = 9500 \cdot \sqrt[3]{f_{cm}} = 9500 \cdot \sqrt[3]{42,4} = 33.126$   
 $f_{cm} = (45+8) \cdot 0,8 = 42,4$  (cilinderdruksterkte ipv kubusdruksterkte)
- $E_c(t_0) = 1,1325 \cdot E_c(28) \cdot \sqrt[3]{(1-t_0)^{-0,35}} = 1,1325 \cdot 33.126 \cdot \sqrt[3]{1-56^{-0,35}} = 34.170$   
 $t_0 = 56$  dagen
- $\beta_a(t_0) = 0,8 \cdot \left( 1 - \frac{f_c(t_0)}{f_c(\infty)} \right) = 0,8 \cdot (1 - 0,77) = 0,184$   
 Bij  $t_0 = 56$  dagen geldt voor  $\frac{f_c(t_0)}{f_c(\infty)}$ : 0,77 volgens Fig. A.1.
- $\phi_d$ , wordt standaard gelijk gesteld aan 0,4.
- $\beta_d(t-t_0)$ , deze is volgens Fig. A.2 gelijk aan 1,0. Voor  $(t-t_0)$  geldt:  $10.000-56 = 9.944$ .
- $\phi_f$  is het product van  $\phi_{f1}$  en  $\phi_{f2}$ .
  - $\phi_{f1}$ , is af te lezen uit Tabel A.1. Voor een Relatieve Vochtigheid van 75 % geldt voor deze factor een waarde van 1,75 (lineaire interpolatie).
  - $\phi_{f2}$  is af te lezen uit Fig. A.3. Bij een fictieve dikte van  $125 \cdot \lambda$  (zie hieronder) geldt voor deze factor een waarde van 1,6.
- $\beta_f(t_c)$ , zal voor  $t_c = 10.000$  gelijk zijn aan 1,0, volgens Fig. A.4.
- $\beta_f(t_{0,c})$  is voor  $t_{0,c} = 56$  dagen gelijk aan 0,50.

- in de twee  $\beta_f$  factoren is een fictieve dikte berekend volgens  $d_f = \lambda \frac{2 \cdot A_c}{U_c}$ , hierin is de breukterm gelijk aan de dikte van 125 mm. De  $\lambda$ -term is gelijk aan 2,375 volgens Tabel A.1 (lineaire interpolatie).

De kruipvervorming op  $t=10.000$  dagen zal dan gelijk zijn aan:

$$\epsilon_{\infty}(t, t_0) = \sigma_0 \cdot J(t, t_0) = 24 \cdot \left[ \frac{1}{34.170} + \frac{0,184}{33.126} + \frac{0,4 \cdot 1,0}{33.126} + \frac{(1,75 \cdot 1,6) \cdot (1,0 - 0,5)}{33.126} \right] = 2,14 \cdot 10^{-3}$$

In Fig. B.2, welke de resultaten van de Excel berekening weergeeft, wordt de kruipvervorming gegeven zijnde  $21,4 \cdot 10^{-4}$ . Welke nagenoeg gelijk is aan de hiervoor berekende waarde.

#### B.4.1.2 Model Code 1990

De kruipvervorming wordt volgens onderstaande formule berekend (formule A.2.6):

$$\epsilon_{\infty}(t, t_0) = \sigma_c(t_0) \cdot \left[ \frac{1}{E_c(t_0)} + \frac{\phi(t, t_0)}{E_{ci}} \right]$$

In deze formule is:

- $\sigma_c(t_0)$  gelijk aan 24 N/mm<sup>2</sup>.
- $E_{ci}$  is gelijk aan onderstaande formule. Hierin is  $E_{c0}$  gelijk aan  $2,15 \cdot 10^4$  MPa,  $f_{cm0}$  is gelijk aan 10 MPa.

$$E_{ci} = E_{c0} \cdot \left( \frac{f_{cm}}{f_{cm0}} \right)^{1/3} \quad f_{cm} = f_{ck} + 8.$$

Hierin is  $f_{ck}$  de cylinder druksterkte. Voor B45 geldt een cylinder druksterkte van 36,15 MPa.

$$E_{ci} = 2,15 \cdot 10^4 \cdot \left( \frac{36,15 + 8}{10} \right)^{1/3} = 35.271$$

- $E_c(t_0)$  wordt berekend met de volgende formules (formule A.2.7, A.2.8 en A.2.5):

$$E_c(t) = \beta_E(t) \cdot E_{ci}, \quad \text{met } \beta_E(t) = \sqrt{\beta_{cc}(t)}, \quad \text{waarin weer } \beta_{cc}(t) = e^{s \left( 1 - \sqrt[28]{t/t_1} \right)}$$

Voor  $s$  geldt voor normaalhardend cement een waarde van 0,25.

Het belastingtijdstip  $t_0$  is 56 dagen.

Hierdoor is  $\beta_{cc}(t)$  gelijk aan: 1,076 en is  $\beta_E(t)$  gelijk aan: 1,0373

$$E_c(t) = 1,0373 \cdot 35.271 = 36.587$$

- Vervolgens kan de kruipcoëfficiënt worden berekend volgens de volgende formules:

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \cdot \beta_c(t - t_0),$$

met:

$$\phi_0 = \phi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0)$$

en hierin

$$\phi_{RH} = 1 + \frac{1 - \frac{RH}{RH_0}}{0,46 \cdot \left( \frac{h}{h_0} \right)^{1/3}}, \quad \text{en } \beta(f_{cm}) = \frac{5,3}{\sqrt{f_{cm}/f_{cm0}}}, \quad \text{en } \beta(t_0) = \frac{1}{0,1 + \left( t_0/t_1 \right)^{0,2}}$$

en:

$$\beta_c(t - t_0) = \left( \frac{(t - t_0)/t_1}{\beta_H + \frac{(t - t_0)}{t_1}} \right)^{0,3} \quad \text{met } \beta_H = 150 \cdot \left\{ 1 + \left( 1,2 \cdot \frac{RH}{RH_0} \right)^{18} \right\} \cdot \frac{h}{h_0} + 250 \leq 1500$$



In deze formules hebben de coëfficiënten de volgende waarden:

- $RH = 75 \%$
- $h = 125 \text{ mm}$
- $f_{cm} = 44,15$
- $t_0 = 56 \text{ dagen}$
- $t = 10.000 \text{ dagen}$ .

Hiermee kan de kruipcoëfficiënt berekend worden:

- $\beta(t_0) = 0,42793$
- $\beta(f_{cm}) = 2,52238$
- $\phi_{RH} = 1,50452$
- $\phi_0 = 0,42793 \cdot 2,52238 \cdot 1,50452 = 1,6240$
- $\beta_h = 465,6$
- $\beta_c(t-t_0) = 0,9863$

De kruipcoëfficiënt is dan:  $\phi(t, t_0) = 1,6240 \cdot 0,9863 = 1,602$

Vervolgens moet gecorrigeerd worden op het type cement en de temperatuur volgens formule A.2.17 en A.2.18.

$$t_o = t_{0,T} \cdot \left[ \frac{9}{2 + \left( \frac{t_{0,T}}{t_{1,T}} \right)^{1,2}} + 1 \right]^\alpha \geq 0,5 \text{ dagen} \quad \text{met} \quad t_{0,T} = \sum_{i=1}^n \Delta t_j \cdot e^{\left( 13,65 - \frac{4000}{273 + \frac{T(\Delta t_j)}{T_0}} \right)}$$

Hierin is:

$\Delta t_j$  het aantal dagen waarbij er een temperatuur  $T$  optreedt, dit is hier: 56 dagen. Bij deze correctie wordt alleen gekeken naar de tijdstippen voor belasten.

$T(\Delta t_j)$   $10,4^\circ\text{C}$ .

Hiermee is  $t_{0,T}$ : 35,2 dagen en daarmee wordt het gecorrigeerde tijdstip van belasten  $t_0$  ook 35,2 dagen. De coëfficiënt  $\alpha$  is bij normaalhardend cement namelijk gelijk aan 0.

### Correctie

Vervolgens moet er nog gecorrigeerd worden op temperatuur na belasten. Dit wordt gedaan volgens de formules A.2.21 t/m A.2.24. De formules A.2.25 en A.2.26 worden niet toegepast omdat het hier geen temperatuuroename boven de  $20^\circ\text{C}$  betreft.

Volgens A.2.21 en A.2.22 wordt de coëfficiënt  $\beta_h$  gecorrigeerd volgens:

$$\beta_{H,T} = \beta_H \cdot \beta_T \quad \text{met} \quad \beta_T = e^{\left[ \frac{1500}{273 + \frac{T}{T_0}} - 5,12 \right]}$$

$\beta_T$  is met een temperatuur van  $10,4^\circ\text{C}$  gelijk aan: 1,1887.

Waarna  $\beta_H$  van hierboven kan worden vervangen door  $\beta_{H,T}$ , welke gelijk is aan:  $465,6 \cdot 1,1887 = 553,5$

Volgens A.2.23 en A.2.24 wordt de coëfficiënt  $\phi_{RH}$  gecorrigeerd volgens:

$$\phi_{RH,T} = \phi_T + (\phi_{RH} - 1) \cdot \phi_T^{1,2} \quad \text{met} \quad \phi_T = e^{\left[ 0,015 \cdot \left( \frac{T}{T_0} - 20 \right) \right]}$$

$\phi_T$  is met een temperatuur van  $10,4^\circ\text{C}$  gelijk aan: 0,8659

De coëfficiënt  $\phi_{RH}$  kan worden vervangen door  $\phi_{RH,T}$  welke gelijk is aan: 1,2904.

Vervolgens kan de kruipcoëfficiënt opnieuw berekend worden. De coëfficiënten die van belang zijn zullen hieronder nogmaals weergegeven worden:

- $\beta(t_0) = 0,4676$  (opnieuw berekend met andere  $t_0$ )
- $\beta(f_{cm}) = 2,52238$  (gelijk gebleven)
- $\phi_{RH,T} = 1,2904$  (gecorrigeerde coëfficiënt)
- $\phi_0 = 0,4676 \cdot 2,52238 \cdot 1,2904 = 1,5220$
- $\beta_{H,T} = 553,5$  (gecorrigeerde coëfficiënt)
- $\beta_c(t-t_0) = 0,9839$  (opnieuw berekend met andere  $t_0$  en gecorrigeerde  $\beta_{H,T}$ ).

De kruipcoëfficiënt is dan:  $\phi(t, t_0) = 1,5220 \cdot 0,9839 = 1,4975$

Om de kruipvervorming te berekenen zal nog eerst de Elasticiteitsmodulus gecorrigeerd moeten worden volgens:

$$E_{ci}(T) = E_{ci} \cdot \left(1,06 - 0,003 \cdot \frac{T}{T_0}\right) = 35.271 \cdot (1,06 - 0,003 \cdot 10,4) = 36.287$$

Hierdoor moet ook  $E_c(t)$  herberekend worden.  $E_c(t) = 36.287 \cdot 1,0373 = 37.641$ .

Nu er een correctie op alle factoren is uitgevoerd kan de krimpvervorming berekend worden.

$$\varepsilon_{cs}(t, t_0) = \sigma_c(t_0) \cdot \left[ \frac{1}{E_c(t_0)} + \frac{\phi(t, t_0)}{E_{ci}} \right] = 24 \cdot \left[ \frac{1}{37.641} + \frac{1,4975}{36.287} \right] = 1,63 \cdot 10^{-3}$$

Volgens de Excel-berekening zie Fig. B.3, is de krimpvermindering  $16,28 \cdot 10^{-4}$ . Deze is dus exact gelijk.

#### B.4.1.3 VBC

De kruipvervorming wordt volgens de VBC met de volgende formule berekend:  $\varepsilon = \frac{\sigma}{E'_b} \cdot (1 + \phi)$

Hierin is:

- $\sigma$  De belasting van 24 N/mm<sup>2</sup>.
- $E'_b$  De elasticiteitsmodulus volgens formule A.4.5 of A.4.6.  
Voor B45 is  $E'_b$ :  $22250 + 250 \cdot 45 = 33.500$
- $\phi$  Volgens:  $\phi = k_c \cdot k_d \cdot k_b \cdot k_h \cdot k_t \leq \phi_{max}$

$$k_t = \frac{t}{t + 0,04 \cdot \sqrt{h_m^3}} = 0,99$$

- $\phi_{max}$  volgens Tabel A.6 bij 75% en B45: 2,1.

$$\phi = 1,9 \cdot 0,91 \cdot 0,9 \cdot 0,9625 \cdot 0,99 = 1,483 \text{ welke kleiner is dan } 2,1.$$

$$\text{De kruipvervorming is dan: } \varepsilon = \frac{24}{33.500} \cdot (1 + 1,483) = 1,779 \cdot 10^{-3}$$

Volgens de Excel berekening in Fig. B.4 is de kruipvervorming:  $17,8 \cdot 10^{-4}$ , wat dus overeenstemt

## B.4.2 Krimp

### B.4.2.1 Model Code 1978

De krimpvervorming wordt in de Model Code 1978 berekend volgens formule A.1.17:

$$\epsilon_{cs}(t, t_0) = \epsilon_{s0} \cdot [\beta_s(t) - \beta_s(t_0)]$$

Hierin wordt  $\epsilon_{s0}$  als het product van  $\epsilon_{s1}$  en  $\epsilon_{s2}$  bepaald.

$\epsilon_{s1}$  wordt via Tabel A.1 bepaald en is bij 75%: -0,0002725.

$\epsilon_{s2}$  wordt via Fig. A.5. afgelezen en is bij een fictieve dikte van  $125 \cdot \lambda$  gelijk aan: 0,89

$\epsilon_{s0}$  is dan:  $-0,0002725 \cdot 1,02 = -0,0002425$

De  $\beta_s$  coëfficiënten worden met Fig. A.6 bepaald.

$\beta_s(t)$  is voor  $t = 10.000$  dagen gelijk aan 1,0

$\beta_s(t_0)$  is voor  $t_0 = 14$  dagen (ontkisten) en een fictieve dikte gelijk aan: 0,14.

De krimpvervorming wordt dan:  $\epsilon_{cs}(t, t_0) = -0,0002425 \cdot (1,0 - 0,14) = -2,09 \cdot 10^{-4}$ .

Volgens de Excel berekening die te vinden is in Fig. B.5 is de krimpvervorming:  $-2,14 \cdot 10^{-4}$ .

Deze kleine afwijking (2,8%) is te wijten aan afleesfouten en lineaire interpolatie bij het aflezen van de grafieken en tabellen.

### B.4.2.2 Model Code 1990

De krimpvervorming wordt in de Model Code 1990 berekend volgens:

$$\epsilon_{cs}(t, t_s) = \epsilon_{cs0} \cdot \beta_s(t - t_s)$$

Met:

$$\epsilon_{cs0} = \epsilon_s(f_{cm}) \cdot \beta_{RH}$$

Hierin is weer:

$$\epsilon_s(f_{cm}) = \left[ 160 + 10 \cdot \beta_{sc} \cdot \left( 9 - \frac{f_{cm}}{f_{cm0}} \right) \right] \cdot 10^{-6} \quad \text{en} \quad \beta_{RH} = -1,55 \cdot \beta_{sRH}, \quad \text{met} \quad \beta_{sRH} = 1 - \left( \frac{RH}{RH_0} \right)^3$$

en:

$$\beta_s(t - t_s) = \sqrt{\frac{\frac{(t - t_s)}{t_1}}{350 \cdot \left( \frac{h}{h_0} \right)^2 + \frac{(t - t_s)}{t_1}}}$$

De factoren die in deze formules zijn toegepast zijn:

- $h$  125 mm
- $t$  10.000 dagen
- $t_s$  14 dagen (ontkisten)
- $RH$  75%
- $f_{cm}$  44,15 MPa
- $\beta_{sc}$  voor normaalhardend cement: 5

Hierbij wordt:

- $\beta_s(t - t_s)$  0,9737
- $\beta_{sRH}$  0,5781
- $\beta_{RH}$  -0,8961
- $\epsilon_s(f_{cm})$   $0,389 \cdot 10^{-3}$
- $\epsilon_{cs0}$   $0,389 \cdot 10^{-3} \cdot -0,8961 = -0,349 \cdot 10^{-3}$

De krimpvervorming is:  $\epsilon_{cs}(t, t_s) = -0,349 \cdot 10^{-3} \cdot 0,9737 = -0,339 \cdot 10^{-3}$ .



**Correctie**

Vervolgens moet er gecorrigeerd worden op temperatuur volgens de formules A.2.27 t/m A.2.29.

- In de formule van de coëfficiënt  $\beta_s(t-t_s)$  moet de factor  $350 \cdot \left(\frac{h}{h_0}\right)^2$  gecorrigeerd worden volgens:

$$\alpha_{sT}(T) = 350 \cdot \left(\frac{h}{h_0}\right)^2 \cdot e^{\left[-0,06 \cdot \left(\frac{T}{T_0} - 20\right)\right]}$$

Ingevuld levert dit:  $\alpha_{sT} = 972,8$  en hiermee wordt  $\beta_s(t-t_s)$ : 0,9546.

- De coëfficiënt  $\beta_{RH}$  moet worden gecorrigeerd volgens  $\beta_{RH,T} = \beta_{RH} \cdot \beta_{sT}$  en hierin is

$$\beta_{sT} = 1 + \left( \frac{8}{103 - 100 \cdot RH / RH_0} \right) \cdot \left( \frac{T/T_0 - 20}{40} \right)$$

Ingevuld levert dit:  $\beta_{sT} = 0,9314$  en hiermee is  $\beta_{RH,T}$  gelijk aan: -0,8347.

De coëfficiënt  $\varepsilon_{cs0}$  wordt nu:  $0,389 \cdot 10^{-3} \cdot -0,8347 = -0,325 \cdot 10^{-3}$

En de uiteindelijke krimpvervorming is:  $\varepsilon_{cs}(t, t_s) = -0,325 \cdot 10^{-3} \cdot 0,9546 = 0,310 \cdot 10^{-3}$ .

Volgens de Excel-berekening is de krimpvervorming:  $(\varepsilon_{cs}(t, t_s, T)) \ 3,10 \cdot 10^{-4}$ .

**B.4.2.3 VBC**

De krimpvervorming volgens de VBC wordt berekend volgens:  $\varepsilon'_r = \varepsilon'_c \cdot k_b \cdot k_h \cdot k_p \cdot k_t < \varepsilon'_{\max}$ .

Hierin zijn:

- $\varepsilon'_c$  volgens Tabel A.7 voor 75% RV: 0,25 ‰
- $k_b$  volgens Tabel A.4 voor B45: 0,9
- $k_h$  volgens Tabel A.8 voor een fictieve dikte van 125 mm: 0,99 (lin. interpolatie)
- $k_p$  afhankelijk van het wapeningspercentage. Bij een aanname van 2% wordt dit volgens

$$k_p = \frac{1}{1 + 0,2 \cdot \omega_0} = 0,714.$$

- $k_t$  volgens de formule met een fictieve dikte van 125 mm en bij  $t = 10.000$  dagen:

$$k_t = \frac{t}{t + 0,04 \cdot \sqrt{h_m^3}} = 0,994.$$

- $\varepsilon'_{\max}$  volgens Tabel A.9 voor B45 en 75% RV: 0,23 ‰.

De krimpvervorming is hiermee:  $\varepsilon'_r = 0,25 \cdot 10^{-3} \cdot 0,9 \cdot 0,99 \cdot 0,714 \cdot 0,994 = 0,158 \cdot 10^{-3}$ .

Volgens de Excel berekening is deze:  $1,579 \cdot 10^{-4}$ .

**B.4.3 De totale vervormingen**

Indien nu de krimp- en kruipvervormingen van de diverse voorschriften worden opgeteld en vermenigvuldigd met de lengte van de uitkragende ligger (1000 mm), zullen de waarden gevonden worden die in Figuur 5.2 zijn weergegeven.

De vervormingen volgens de voorschriften zijn:

- De Model Code 1978:  $(21,4 + 2,09) \cdot 10^{-4} \times 1000 = 2,35$  mm.
- De Model Code 1990:  $(1,63 + 0,31) \cdot 10^{-3} \times 1000 = 1,94$  mm.
- De VBC:  $(1,779 + 0,158) \cdot 10^{-3} = 1,94$  mm.



**Bijlage C**

**Vervormingsgrafieken 2<sup>e</sup> Stichtse Brug (Hfdst. 8)**







In deze Bijlage zijn de vervormingsgrafieken te zien, zoals ze in Hoofdstuk 8.3 ook te zien zijn. De grafieken hier zijn verschaald en zo gemaakt dat gemakkelijk is om toekomstige meetpunten in te vullen.

Let wel, de waarden die ingevuld dienen te worden, moeten de netto-zakkingen zijn. Dit zijn de gemiddelde zakkingen ter plaatse van het midden van de overspanning waarop de gemiddelde zakkingen van de steunpunten in mindering moeten worden gebracht.

Zie de volgende pagina voor nog wat handige data.

