

Vervormingsgedrag

Uitbouwbruggen



Hoofdstudie

Afstudeerwerk van:
Ing. M.A.E. Hermans

December 2000



Ministerie van Verkeer en Waterstaat
Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat
Bouwdienst Rijkswaterstaat
Hoofdafdeling Droge Infrastructuur
Afdeling Ontwikkeling Technieken


TU Delft
Technische Universiteit Delft

Faculteit der Civiele Techniek
en Geowetenschappen
Subfaculteit Civiele Techniek
Vakgroep Mechanica & Constructies
Sectie Betonconstructies



Voorwoord

Ter afsluiting van de studie tot civieltechnisch ingenieur aan de Technische Universiteit te Delft, dient een afstudeerwerk gemaakt te worden.

Het rapport dat voor u ligt is het deelverslag van mijn afstudeerwerk. Samen met het andere deelverslag, de *Voorstudie* is dit mijn afstudeerwerk. Ik studeer af bij de sectie Betonconstructies, onderdeel van de afdeling Mechanica, Materialen en Constructies.

Het afstuderen is aangeboden en uitgevoerd bij de Bouwdienst Rijkswaterstaat te Tilburg, hoofdafdeling Droge Infrastructuur, afdeling Ontwikkeling Technieken.

Bij deze wil ik dan ook Rijkswaterstaat van harte bedanken voor de geboden faciliteiten en mogelijkheden. Speciale dank gaat uit naar mijn dagelijks begeleider ing. N. Kaptijn, voor zijn inzet, begeleiding en prettige samenwerking. Verder wil ik nog eenieder binnen Rijkswaterstaat bedanken die mij op enigerwijze te hulp heeft gestaan. Wie de schoen denkt te passen....

Hiernaast wil ik ook mijn begeleider op de TU, dr. ir. C. van der Veen, alsmede prof. dr. ir. J.C. Walraven hartelijk danken voor de geboden begeleiding tijdens het afstuderen.

Tilburg, december 2000
Mark Hermans

Samenvatting

Bij de bouw van uitbouwbruggen spelen naast de direct optredende vervormingen, ook de tijdsafhankelijke vervormingen een belangrijke rol. Deze tijdsafhankelijke vervormingen zijn al een bron van onderzoek geweest voor diverse andere afstudeerders. Door voortschrijdende rekenmogelijkheden (het rekenprogramma Bridges) en materiaalontwikkelingen (hogesterkte beton) bleek het gewenst om nogmaals onderzoek te verrichten naar het vervormingsgedrag van uitbouwbruggen. Vandaar dit afstudeerrapport.

Dit afstudeerrapport bestaat uit een Voorstudie en een Hoofdstudie. De voorstudie heeft als doel om tot een algemeen inzicht te komen betreffende het tijdsafhankelijke vervormingsgedrag van uitbouwbruggen. Er is daarvoor in de voorstudie toelichting hoe een uitbouwbrug gebouwd wordt. Beschreven is wat de tijdsafhankelijke vervormingen zijn, en waardoor zij optreden. Vervolgens zijn de onderzoeken van de andere afstudeerders samengevat. Er wordt besproken wat zij onderzocht hebben en wat hun conclusies zijn. Aan de hand van deze conclusies kan in de hoofdstudie doelgericht onderzoek plaatsvinden.

In de voorstudie zijn ook de vervormingsmetingen van zoveel mogelijk uitbouwbruggen geïnventariseerd. Bij uitbouwbruggen worden met enige regelmaat hoogtemetingen verricht. Deze metingen zijn verzameld en weergegeven.

In de hoofdstudie is het rekenprogramma Bridges toelichtend. Dit rekenprogramma wordt tegenwoordig door de Bouwdienst gebruikt om gefaseerde berekeningen uit te voeren. Gefaseerde berekeningen zijn berekeningen waarbij de daadwerkelijke bouw(volgorde) kan worden gesimuleerd. De diverse andere afstudeerders hebben veelal onderzoek gedaan aan de hand van andere programmatuur (DIANA, BOUW). Conclusies waren dan ook vaak programmatuur-afhankelijk.

Om tot goede en duidelijk onderbouwde conclusies te komen, zijn de formuleringen van diverse voorschriften weergegeven en zijn ze onderzocht op verschillen met betrekking tot de formulering van de tijdsafhankelijke vervormingen. Het programma Bridges rekent volgens een ouder voorschrift, de Model Code 1978. De opvolger van dit voorschrift is de Model Code 1990. Binnen Bridges is het in principe niet mogelijk om volgens dit voorschrift te rekenen. Het is echter gewenst volgens dit nieuwere voorschrift berekeningen uit te voeren, er bestaat namelijk een duidelijk vermoeden dat dit voorschrift tot betere resultaten zal leiden dan de Model Code 1978. Om de Model Code 1990 te gebruiken, is gepoogd dit voorschrift in Bridges te simuleren. Dit is gedeeltelijk succesvol geweest. De totaal verschillende wijze van de formuleringen en de inflexibiliteit van Bridges maakten een volledige simulatie van de Model Code 1990 in Bridges onmogelijk.

De 2^e Stichtse Brug is de eerste uitbouwbrug in hogesterkte beton. Vanwege dit feit is voor deze brug een uitgebreid monitoring-onderzoek opgezet. De resultaten van het onderzoek worden in dit afstudeeronderzoek besproken en nader onderzocht. Ook zijn andere onderzoeken naar het tijdsafhankelijke vervormingsgedrag van beton behandeld. Doel van deze inventarisatie is om te komen tot een duidelijk beeld betreffende de toepasbaarheid van de diverse voorschriften. Al gauw bleek dat een deel van de monitoring-gegevens van de 2^e Stichtse Brug niet bruikbaar genoeg zijn voor dit afstudeeronderzoek. Het bruikbare deel samen met de andere onderzoeken leidde tot de conclusie dat de Model Code 1990 het tijdsafhankelijke vervormingsgedrag (voor hogesterkte beton) het beste voorspelt.

De bouw van de 2^e Stichtse Brug is in september 1997 afgerond. Hierna is de verticale vervorming van de brug ingemeten en er zijn thans 2 vervolgmetingen verricht, de laatste in november 1999. Het midden van de hoofdoverspanning is netto 14 mm doorgebogen. De (ontwerp)-voorspelling van Rijkswaterstaat is dat de brug na 30 jaar ongeveer 12 à 13 cm door zal buigen. De voorspelling volgens de Model Code 1990 is slechts 5,5 à 6 cm. Indien de waarden volgens de Model Code 1990 worden aangepast op gemeten waarden uit het monitoring-rapport (krimp, kruip en E-modulus) wordt de voorspelde doorbuiging nog minder. De voorspelling die hier uit volgt en door mij gesteund wordt is dat de brug na 30 jaar ongeveer 4,5 cm door zal buigen.

De vervormingen tijdens de bouw konden eveneens redelijk worden voorspeld.

Naast de 2^e Stichtse Brug zijn er in Nederland een groot aantal andere uitbouwbruggen gebouwd. Niet in hogesterkte beton, maar in lichtbeton of in 'normaal' grindbeton. Lichtbeton bleek niet het materiaal waar Rijkswaterstaat mee verder wilde, de bruggen die tot voor kort gebouwd werden zijn dan ook in grindbeton gebouwd. Van een aantal grindbeton bruggen waren nog computer-invoerbestanden aanwezig. De bruggen zijn doorgerekend met de voorloper van Bridges, het programma Bouw. Een drietal bruggen (B35) zijn in het kader van dit afstudeeronderzoek nogmaals doorgerekend. De Model Code 1978 bleek, zoals ook al geconcludeerd door Rijkswaterstaat en de andere afstudeerders, de vervormingen te onderschatten. De gemeten vervormingen zijn groter dan de berekende. De voorspellingen volgens Model Code 1990 waren echter nog slechter. De berekeningen volgens dit voorschrift leidden tot nog kleinere vervormingen dan de Model Code 1978. Het is dan ook aan te bevelen bij (her)berekening van grindbetonbruggen te rekenen volgens de Model Code 1978 met een verhoging van de basiskruipcoëfficiënt van 40%. Dan wordt er een goede voorspelling op langere termijn verkregen.

Het (tijdsafhankelijke) vervormingsgedrag blijkt redelijk voorspeld te kunnen worden. Voorwaarde is wel dat goed bekeken wordt met welk voorschrift gerekend dient te worden. Afhankelijk van de beoogde betonsterkteklasse moet een passende tuning van de voorschriften worden gekozen voor de krimp en kruip. De beste manier is om laboratoriumproeven uit te voeren met een relatieve vochtigheid, temperatuur en fictieve dikte die in de praktijk verwacht kunnen worden. Hierdoor kan de krimp en kruip, samen met de ontwikkeling van de sterkte en de E-modulus nog beter getuned worden. Het is verder verstandig om bij een toekomstige ontwerp-berekening een gevoeligheidsanalyse uit te voeren. Door de brug eenmaal te berekenen met materiaaleigenschappen die een grote vervormingen eenmaal met eigenschappen die kleinere vervormingen zullen geven, kan men redelijk voorspellen binnen welke marge de vervormingen te verwachten zijn. Dat vervormingen nooit exact te voorspellen zijn moge duidelijk zijn, dit is inherent aan het materiaal en het immer boeiende vakgebied.

Inhoudsopgave

VOORWOORD	
SAMENVATTING	
INHOUDSOPGAVE	1
1 INLEIDING	3
2 VERKENNING BRIDGES	5
2.1 INLEIDING	5
2.2 HET PROGRAMMA	5
2.3 HET MATERIALEN-BESTAND	7
3 TIJDSAFHANKELIJKE FACTOREN VOLGENS DE DIVERSE VOORSCHRIFTEN	9
3.1 INLEIDING	9
3.2 CEB-FIP MODEL CODE 1978	9
3.3 CEB-FIP MODEL CODE 1990	10
3.4 EUROCODE	11
3.5 VBC 1995 - NEN 6720	11
4 VERGELIJKING VAN DE VOORSCHRIFTEN	13
4.1 INLEIDING	13
4.2 GRINDBETON	14
4.2.1 Vergelijking kruipvervorming	14
4.2.2 Vergelijking krimpvervorming	16
4.3 HOGE STERKTE BETON	18
4.3.1 Vergelijking kruipvervorming	18
4.3.2 Vergelijking krimpvervorming	19
4.4 TEMPERATUUREFFECT MODEL CODE 1990	21
5 BRIDGES EN DE VOORSCHRIFTEN	23
5.1 INLEIDING	23
5.2 VERGELIJKING BRIDGES MET DE VOORSCHRIFTEN	24
5.2.1 B45	25
5.2.2 B85	26
5.3 BRIDGES MODELLEREN ALS DE MODEL CODE 1990	27
5.3.1 Kruip-modellering	27
5.3.2 Krimp-modellering	30
5.3.3 Controle	30
5.4 CONCLUSIES	32
6 DE BEREKENINGEN NADER TOEGELICHT	33

Voorwoord

Ter afsluiting van de studie tot civieltechnisch ingenieur aan de Technische Universiteit te Delft, dient een afstudeerwerk gemaakt te worden.

Het rapport dat voor u ligt is het deelverslag van mijn afstudeerwerk. Samen met het andere deelverslag, de *Voorstudie* is dit mijn afstudeerwerk. Ik studeer af bij de sectie Betonconstructies, onderdeel van de afdeling Mechanica, Materialen en Constructies.

Het afstuderen is aangeboden en uitgevoerd bij de Bouwdienst Rijkswaterstaat te Tilburg, hoofdafdeling Droge Infrastructuur, afdeling Ontwikkeling Technieken.

Bij deze wil ik dan ook Rijkswaterstaat van harte bedanken voor de geboden faciliteiten en mogelijkheden. Speciale dank gaat uit naar mijn dagelijks begeleider ing. N. Kaptijn, voor zijn inzet, begeleiding en prettige samenwerking. Verder wil ik nog eenieder binnen Rijkswaterstaat bedanken die mij op enigerwijze te hulp heeft gestaan. Wie de schoen denkt te passen....

Hiernaast wil ik ook mijn begeleider op de TU, dr. ir. C. van der Veen, alsmede prof. dr. ir. J.C. Walraven hartelijk danken voor de geboden begeleiding tijdens het afstuderen.

Tilburg , december 2000
Mark Hermans

Samenvatting

Bij de bouw van uitbouwbruggen spelen naast de direct optredende vervormingen, ook de tijdsafhankelijke vervormingen een belangrijke rol. Deze tijdsafhankelijke vervormingen zijn al een bron van onderzoek geweest voor diverse andere afstudeerders. Door voortschrijdende rekenmogelijkheden (het rekenprogramma Bridges) en materiaalontwikkelingen (hogesterkte beton) bleek het gewenst om nogmaals onderzoek te verrichten naar het vervormingsgedrag van uitbouwbruggen. Vandaar dit afstudeerrapport.

Dit afstudeerrapport bestaat uit een Voorstudie en een Hoofdstudie. De voorstudie heeft als doel om tot een algemeen inzicht te komen betreffende het tijdsafhankelijke vervormingsgedrag van uitbouwbruggen. Er is daarvoor in de voorstudie toegelicht hoe een uitbouwbrug gebouwd wordt. Beschreven is wat de tijdsafhankelijke vervormingen zijn, en waardoor zij optreden. Vervolgens zijn de onderzoeken van de andere afstudeerders samengevat. Er wordt besproken wat zij onderzocht hebben en wat hun conclusies zijn. Aan de hand van deze conclusies kan in de hoofdstudie doelgericht onderzoek plaatsvinden.

In de voorstudie zijn ook de vervormingsmetingen van zoveel mogelijk uitbouwbruggen geïnventariseerd. Bij uitbouwbruggen worden met enige regelmaat hoogtemetingen verricht. Deze metingen zijn verzameld en weergegeven.

In de hoofdstudie is het rekenprogramma Bridges toegelicht. Dit rekenprogramma wordt tegenwoordig door de Bouwdienst gebruikt om gefaseerde berekeningen uit te voeren. Gefaseerde berekeningen zijn berekeningen waarbij de daadwerkelijke bouw(volgorde) kan worden gesimuleerd. De diverse andere afstudeerders hebben veelal onderzoek gedaan aan de hand van andere programmatuur (DIANA, BOUW). Conclusies waren dan ook vaak programmatuur-afhankelijk.

Om tot goede en duidelijk onderbouwde conclusies te komen, zijn de formuleringen van diverse voorschriften weergegeven en zijn ze onderzocht op verschillen met betrekking tot de formulering van de tijdsafhankelijke vervormingen. Het programma Bridges rekent volgens een ouder voorschrift, de Model Code 1978. De opvolger van dit voorschrift is de Model Code 1990. Binnen Bridges is het in principe niet mogelijk om volgens dit voorschrift te rekenen. Het is echter gewenst volgens dit nieuwere voorschrift berekeningen uit te voeren, er bestaat namelijk een duidelijk vermoeden dat dit voorschrift tot betere resultaten zal leiden dan de Model Code 1978. Om de Model Code 1990 te gebruiken, is gepoogd dit voorschrift in Bridges te simuleren. Dit is gedeeltelijk succesvol geweest. De totaal verschillende wijze van de formuleringen en de inflexibiliteit van Bridges maakten een volledige simulatie van de Model Code 1990 in Bridges onmogelijk.

De 2^e Stichtse Brug is de eerste uitbouwbrug in hogesterkte beton. Vanwege dit feit is voor deze brug een uitgebreid monitoring-onderzoek opgezet. De resultaten van het onderzoek worden in dit afstudeeronderzoek besproken en nader onderzocht. Ook zijn andere onderzoeken naar het tijdsafhankelijke vervormingsgedrag van beton behandeld. Doel van deze inventarisatie is om te komen tot een duidelijk beeld betreffende de toepasbaarheid van de diverse voorschriften. Al gauw bleek dat een deel van de monitoring-gegevens van de 2^e Stichtse Brug niet bruikbaar genoeg zijn voor dit afstudeeronderzoek. Het bruikbare deel samen met de andere onderzoeken leidden tot de conclusie dat de Model Code 1990 het tijdsafhankelijke vervormingsgedrag (voor hogesterkte beton) het beste voorspelt.

De bouw van de 2^e Stichtse Brug is in september 1997 afgerond. Hierna is de verticale vervorming van de brug ingemeten en er zijn thans 2 vervolgmetingen verricht, de laatste in november 1999. Het midden van de hoofdoverspanning is netto 14 mm doorgebogen. De (ontwerp)-voorspelling van Rijkswaterstaat is dat de brug na 30 jaar ongeveer 12 à 13 cm door zal buigen. De voorspelling volgens de Model Code 1990 is slechts 5,5 à 6 cm. Indien de waarden volgens de Model Code 1990 worden aangepast op gemeten waarden uit het monitoring-rapport (krimp, kruip en E-modulus) wordt de voorspelde doorbuiging nog minder. De voorspelling die hier uit volgt en door mij gesteund wordt is dat de brug na 30 jaar ongeveer 4,5 cm door zal buigen.

De vervormingen tijdens de bouw konden eveneens redelijk worden voorspeld.

Naast de 2^e Stichtse Brug zijn er in Nederland een groot aantal andere uitbouwbruggen gebouwd. Niet in hogesterkte beton, maar in lichtbeton of in 'normaal' grindbeton. Lichtbeton bleek niet het materiaal waar Rijkswaterstaat mee verder wilde, de bruggen die tot voor kort gebouwd werden zijn dan ook in grindbeton gebouwd. Van een aantal grindbeton bruggen waren nog computer-invoerbestanden aanwezig. De bruggen zijn doorgerekend met de voorloper van Bridges, het programma Bouw. Een drietal bruggen (B35) zijn in het kader van dit afstudeeronderzoek nogmaals doorgerekend. De Model Code 1978 bleek, zoals ook al geconcludeerd door Rijkswaterstaat en de andere afstudeerders, de vervormingen te onderschatten. De gemeten vervormingen zijn groter dan de berekende. De voorspellingen volgens Model Code 1990 waren echter nog slechter. De berekeningen volgens dit voorschrift leidden tot nog kleinere vervormingen dan de Model Code 1978. Het is dan ook aan te bevelen bij (her)berekening van grindbetonbruggen te rekenen volgens de Model Code 1978 met een verhoging van de basiskruipcoëfficiënt van 40%. Dan wordt er een goede voorspelling op langere termijn verkregen.

Het (tijdsafhankelijke) vervormingsgedrag blijkt redelijk voorspeld te kunnen worden. Voorwaarde is wel dat goed bekeken wordt met welk voorschrift gerekend dient te worden. Afhankelijk van de beoogde betonsterkteklasse moet een passende tuning van de voorschriften worden gekozen voor de krimp en kruip. De beste manier is om laboratoriumproeven uit te voeren met een relatieve vochtigheid, temperatuur en fictieve dikte die in de praktijk verwacht kunnen worden. Hierdoor kan de krimp en kruip, samen met de ontwikkeling van de sterkte en de E-modulus nog beter getuned worden. Het is verder verstandig om bij een toekomstige ontwerp-berekening een gevoeligheidsanalyse uit te voeren. Door de brug eenmaal te berekenen met materiaaleigenschappen die een grote vervormingen eenmaal met eigenschappen die kleinere vervormingen zullen geven, kan men redelijk voorspellen binnen welke marge de vervormingen te verwachten zijn. Dat vervormingen nooit exact te voorspellen zijn moge duidelijk zijn, dit is inherent aan het materiaal en het immer boeiende vakgebied.

Inhoudsopgave

VOORWOORD	
SAMENVATTING	
INHOUDSOPGAVE	1
1 INLEIDING	3
2 VERKENNING BRIDGES	5
2.1 INLEIDING	5
2.2 HET PROGRAMMA	5
2.3 HET MATERIALEN-BESTAND	7
3 TIJDSAFHANKELIJKE FACTOREN VOLGENS DE DIVERSE VOORSCHRIFTEN	9
3.1 INLEIDING	9
3.2 CEB-FIP MODEL CODE 1978	9
3.3 CEB-FIP MODEL CODE 1990	10
3.4 EUROCODE	11
3.5 VBC 1995 - NEN 6720	11
4 VERGELIJKING VAN DE VOORSCHRIFTEN	13
4.1 INLEIDING	13
4.2 GRINDBETON	14
4.2.1 Vergelijking kruipvervorming	14
4.2.2 Vergelijking krimpvervorming	16
4.3 HOGE STERKTE BETON	18
4.3.1 Vergelijking kruipvervorming	18
4.3.2 Vergelijking krimpvervorming	19
4.4 TEMPERATUUREFFECT MODEL CODE 1990	21
5 BRIDGES EN DE VOORSCHRIFTEN	23
5.1 INLEIDING	23
5.2 VERGELIJKING BRIDGES MET DE VOORSCHRIFTEN	24
5.2.1 B45	25
5.2.2 B85	26
5.3 BRIDGES MODELLEREN ALS DE MODEL CODE 1990	27
5.3.1 Kruip-modellering	27
5.3.2 Krimp-modellering	30
5.3.3 Controle	30
5.4 CONCLUSIES	32
6 DE BEREKENINGEN NADER TOEGELICHT	33

7 RESULTATEN ONDERZOEKEN	35
7.1 INLEIDING	35
7.2 MONITORING 2 ^E STICHTSE BRUG	35
7.2.1 <i>Temperatuur en relatieve vochtigheid</i>	36
7.2.2 <i>Kubusdruksterkte</i>	37
7.2.3 <i>Elasticiteitsmodulus</i>	37
7.2.4 <i>Krimpmetingen</i>	38
7.2.5 <i>Kruipmetingen</i>	45
7.3 MONITORING WESTBRUG DINTELHAVEN	48
7.4 MONITORING OOSTBRUG VIANEN	49
7.5 ONDERZOEKSRAPPORT TU DELFT	50
7.5.1 <i>Krimpmetingen</i>	50
7.5.2 <i>Kruipmetingen</i>	51
7.6 ONDERZOEKSRAPPORT TU DELFT	52
7.7 CONCLUSIE	54
8 VERGELIJKING BEREKENDE EN GEMETEN WAARDEN 2^E STICHTSE BRUG	57
8.1 INLEIDING	57
8.2 ALGEMEEN	57
8.2.1 <i>Bepaling fictieve dikte</i>	58
8.2.2 <i>Tijdstippen van belasten</i>	58
8.2.3 <i>De materialen - bestanden</i>	59
8.3 ZAKKINGEN GEDURENDE DE GEBRUIKSFASE	66
8.3.1 <i>Gemetten zakkingen</i>	66
8.3.2 <i>Berekende zakkingen</i>	67
8.4 ZAKKINGEN GEDURENDE DE BOUWFASE	69
8.5 VERVORMINGEN IN DE DIVERSE MOTEN	73
8.5.1 <i>Moot 2</i>	73
8.5.2 <i>Moot 13</i>	75
8.5.3 <i>Moot 15</i>	76
8.5.4 <i>Berekenen vervorming moten</i>	78
8.5.5 <i>De vervormingen nader beschouwd</i>	80
8.6 GEVOELIGHEIDSANALYSE	81
8.7 CONCLUSIES	84
9 HERBEREKENING DIVERSE BRUGGEN	87
9.1 INLEIDING	87
9.2 MATERIALEN-FILES	88
9.3 RESULTATEN HERBEREKENING	89
9.3.1 <i>Empel</i>	89
9.3.2 <i>Grubbenvorst</i>	90
9.3.3 <i>Ravenstein</i>	90
9.3.4 <i>Rheden</i>	91
9.4 CONCLUSIE	92
10 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	93
10.1 CONCLUSIES	93
10.2 AANBEVELINGEN	96
LITERATUURLIJST	97

BIJLAGE A DE DIVERSE VOORSCHRIFTEN (HFDST. 3)

BIJLAGE B DE HANDBEREKENING (HFDST. 6)

BIJLAGE C VERVORMINGSGRAFIEKEN 2^E STICHTSE BRUG (HFDST. 8)

1 Inleiding

Rijkswaterstaat heeft vanaf 1963 tot heden vele betonnen bruggen over 's lands grotere kanalen en rivieren laten bouwen in de vorm van zogenaamde uitbouwbruggen. Bij de bouw van dit soort bruggen wordt gebruik gemaakt van de steigerloze uitbouwmethode. Hierbij wordt de brug vanuit de steunpunten symmetrisch uitgebouwd. In het midden van de hoofdoverspanning en in de zijvelden worden de brughelften met elkaar of met de aanbruggen verbonden door middel van een zogenaamde sluitmoot. Nadat de sluitmoot is aangebracht, verandert het statische systeem van een statisch bepaalde uitkragende ligger in een statisch onbepaalde doorgaande ligger.

Door de bouwwijze van uitbouwbruggen en door de vervormingseigenschappen van beton treden, naast directe vervormingen tijdens de bouw van de brug, in de gebruiksfase de zogenaamde tijdsafhankelijke vervormingen op.

Het is belangrijk te weten wat de grootte van deze vervormingen op de lange duur zal zijn. Want ook nadat het bouwwerk deze vervormingen heeft ondergaan, moet het nog zijn oorspronkelijke functies kunnen vervullen. Met wil uiteindelijk bereiken dat, wanneer alle vervormingsprocessen zijn uitgewerkt, de werkelijke langsdoorsnede van de brug (het verticaal alignement, ofwel het hoogteverloop van de brug) het gewenste verloop zo goed mogelijk benadert. De verwachte zakkingen worden in de vorm van overhoogten aan het ontwerp meegegeven, zodat na verloop van tientallen jaren de brug het gewenste verloop zal krijgen.

Het berekenen van die overhoogten deed men aanvankelijk met de hand op basis van vrij eenvoudige regels en aannamen. In 1979 werd voor RWS het computerprogramma *Bouw* ontwikkeld. Met dit programma is gedurende lange tijd ervaring opgedaan. In de loop der tijd konden de uitkomsten getoetst worden aan zakkingsmetingen van een aantal uitbouwbruggen. Uit deze vergelijkingen bleek dat de gevonden uitkomsten te optimistisch waren.

Naar aanleiding van het bovenstaande, is er in 1985 bij Rijkswaterstaat een studiegroep opgericht met als doelstelling het ijken van het programma *Bouw* en opsporen van bruggen welke buiten het verwachtingspatroon vallen. In de loop der jaren is de studiegroep afgeslankt en is de uitvoering van de werkzaamheden stil komen te liggen. Hierna hebben een aantal afstudeerders van de TU Delft deze werkzaamheden opgepakt en onderzoeken naar de fenomenen gedaan. De conclusies en aanbevelingen van deze afstudeerders hebben echter niet tot een eenduidig resultaat geleid.

Vanwege dit en vanwege het arriveren van een nieuw tijdperk, namelijk het bouwen in hogesterktebeton heeft er toe geleid dat mijn onderzoek wordt uitgevoerd.

Het doel van dit afstudeerwerk is dan ook tot een eenduidig resultaat te komen wat betreft de gedane onderzoeken en dit aan te vullen met nieuwe bevindingen en nieuwe rekenmethoden. Verder zal er onderzoek gedaan worden naar hogesterkte betonnen uitbouwbruggen. De 2^e Stichtse Brug, is de eerste uitbouwbrug in hogesterkte beton. Deze brug is vanwege dit feit uitgebreid gemonitord. De eerste vervormingsmetingen aan deze bruggen geven te kennen dat de berekeningsresultaten voor dit type bruggen grotere doorbuigingen voorspellen als in de praktijk worden gemeten. In dit afstudeeronderzoek zal dan ook een evaluatie van de gemeten gegevens plaatsvinden om een goed beeld te krijgen van de tijdsafhankelijke vervormingen van hogesterkte beton.

Dit afstudeerwerk bestaat uit een *Voorstudie* en een *Hoofdstudie*. In de Voorstudie is weergegeven hoe een uitbouwbrug wordt gebouwd en wat tijdsafhankelijke vervormingen zijn. Verder zijn de onderzoeken van andere afstudeerders samengevat. En ook zijn de hoogtemetingen van uitbouwbruggen geïnventariseerd. De Hoofdstudie die voor u ligt, is als volgt opgebouwd. Als eerste zal het computerprogramma *Bridges* worden besproken. Dit programma is de opvolger van *Bouw*. In hoofdstuk 2 zal informatie te vinden zijn over het programma en de mogelijkheden en beperkingen ervan.

In hoofdstuk 3 zullen de voorschriften besproken worden die gebruikt worden om (tijdsafhankelijke) vervormingen mee te berekenen.

In het volgende hoofdstuk zal bekeken worden of de voorschriften de tijdsafhankelijke vervormingen hetzelfde voorspellen. En wanneer dit niet het geval mocht zijn, op welke wijze de voorschriften ten opzichte van elkaar afwijken.

In hoofdstuk 5 zal vervolgens bekeken worden of het mogelijk is om de voorschriften binnen Bridges te gebruiken, en tot welke problemen dit eventueel zal leiden. Om te controleren of Bridges de voorschriften juist benaderd worden er diverse handberekeningen uitgevoerd.

De handberekening zal in hoofdstuk 6 toe worden gelicht.

In hoofdstuk 7 worden vervolgens een aantal onderzoeken besproken. Hieronder valt ook het monitoringrapport van de 2^e Stichtse Brug. Er zal onderzocht worden of de voorschriften gemeten tijdsafhankelijke vervormingen juist voorspellen. En wanneer dit niet het geval mocht zijn, zal bekeken worden op welke punten deze voorschriften afwijken.

De 2^e Stichtse Brug zal in hoofdstuk 8 opnieuw worden doorgerekend op basis van een aantal verschillende uitgangspunten. Er zal een gevoeligheidsanalyse worden uitgevoerd om na te gaan welke factoren invloed hebben op het vervormingsgedrag van de uitbouwbrug.

In hoofdstuk 9 worden nog een aantal grindbetonnen uitbouwbruggen doorgerekend. Van een aantal bruggen is namelijk nog een invoer-bestand bewaard gebleven.

De conclusies uit dit afstudeerrapport zullen in hoofdstuk 10 worden samengevat en er zullen aanbevelingen worden gepresenteerd.

2 Verkenning Bridges

2.1 Inleiding

Bridges is het computerprogramma dat tegenwoordig gebruikt wordt om brugconstructies die in fasen worden gebouwd te berekenen. Het is de opvolger van het programma Bouw en is uitermate geschikt voor het berekenen van uitbouwbruggen en tuibruggen.

Zoals in de *Voorstudie* al is gebleken is het berekening van een uitbouwbrug volgens de gefaseerde berekening van essentieel belang om tot goede resultaten te komen. Gefaseerd wil zeggen dat de berekening en de daadwerkelijke bouw zo veel mogelijk één op één verloopt. Met een programma als Bridges kan dit. In het programma kan men aangeven op welk tijdstip een moot gestort wordt, wanneer men deze ontkist, wanneer de voorspankabels gespannen worden en op welke tijdstippen verdere rustende en mobiele belastingen aanwezig zijn.

In dit hoofdstuk zal het programma Bridges worden toegelicht. Als eerste zal er iets over het programma in het algemeen worden verteld, hoe invoer tot stand komt e.d.

Vervolgens zal het zogenaamde materialen-bestand aan de orde komen. Dit zal een belangrijk instrument zijn om aanpassingen te doen aan de berekening van het programma.

Bridges zal in dit afstudeeronderzoek gebruikt worden om tijdsafhankelijke vervormingen uit te rekenen. Dit zal zowel gebeuren voor eenvoudige constructies, als voor uitbouwbruggen. Er is gezocht naar de invoerfiles van uitbouwbruggen voor het oude programma Bouw. Aangezien dit de voorloper van Bridges is, is er een converteringsprogramma door de maker van beide programma's geschreven. Met dit programma kan eenvoudig de invoer van Bouw gebruikt worden voor Bridges. Welke uitbouwbruggen doorgerekend worden is verderop in dit afstudeerwerk terug te vinden.

De eenvoudige constructies waarmee ook in Bridges gerekend is, zijn gebruikt om Bridges te leren kennen. Deze zijn ook van belang om inzicht te krijgen hoe in het programma aanpassingen gedaan kunnen worden, om te zorgen dat tijdsafhankelijke vervormingen adequater worden benaderd. Ofwel dat de tijdsafhankelijke vervormingen van uitbouwbruggen beter gesimuleerd kunnen worden. Uitgangspunten hierbij zijn onder andere de hoogtemetingen die in de *Voorstudie* zijn weergegeven. Andere uitgangspunten zijn de diverse soorten metingen en proeven die later in dit afstudeerwerk naar voren komen.

2.2 Het programma

Een volledige toelichting van het programma gaat te ver in het kader van dit afstudeeronderzoek. Vandaar dat in dit hoofdstuk alleen belangrijke programma-eigenschappen zullen worden toegelicht.

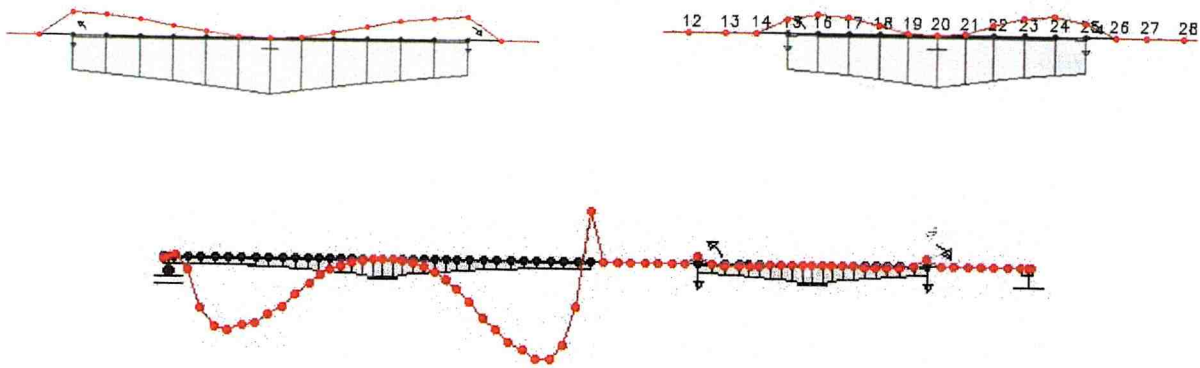
Bridges rekent volgens de krimp- en kruipformuleringen van de CEB-FIP Model Code 1978. De gebruiker kan in een zogenaamde materialen-bestand de specifieke eigenschappen van de diverse materialen opgeven. Een voorbeeld van een materialen-bestand is in de volgende paragraaf te zien. Zoals in de *Voorstudie* naar voren is gekomen, is er een nieuwer voorschrift voorhanden, de Model Code 1990. Echter is het (in eerste instantie) niet mogelijk om volgens dit voorschrift binnen Bridges te rekenen. De opvolger van Bridges zal wel een dergelijke optie hebben. Echter zal de opvolger (ALP 2000) niet op tijd gereed zijn om in dit afstudeerwerk te gebruiken. Dit nieuwe programma is van de zelfde maker als Bouw en Bridges. ALP 2000 zal in de toekomst door Rijkswaterstaat gebruikt worden als opvolger van Bridges.

Of ook daadwerkelijk de Model Code 1990 tot betere resultaten komt in vergelijking met de Model Code 1978 is in de *Voorstudie* nog niet geheel duidelijk geworden. Daartoe zal in dit afstudeerwerk ook een onderling vergelijking gemaakt worden tussen deze twee voorschriften.

Het programma Bridges wordt vanzelfsprekend niet alleen gebruikt om tijdsafhankelijke vervormingen uit te rekenen. Het wordt voor de gehele ontwerp-berekening van een uitbouwbrug gebruikt. Onder andere voor het bepalen van spanningen, en daarmee de hoeveelheid voorspanning. In dit afstudeeronderzoek zal hoofdzakelijk gebruikt gemaakt worden van de optie tot het bepalen van tijdsafhankelijke vervormingen. Zoals gezegd wordt bij het berekenen van uitbouwbruggen hier alleen gebruikt gemaakt van bestaande invoerbestanden. Het zelf invoeren van een uitbouwbrug zou zeer veel tijd kosten, niet alleen wat betreft de invoer zelf, maar ook het verzamelen van de constructiegegevens van een brug.

In deze toelichting zal dan ook alleen ingegaan worden op de berekening van de vervormingen binnen Bridges, met het bestaande invoer-bestand.

Uitgangspunt is hier het invoer-bestand van de 2^e Stichtse Brug.



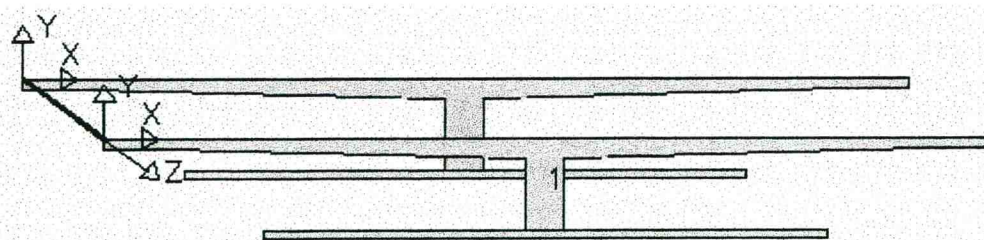
Hierboven zijn enkele grafische resultaten te zien van de vervormingen. De figuur links-boven geeft het vervormingsgedrag weer van een gedeelte van de in aanbouw zijnde kraagarm. Op het tijdstip waarop deze figuur is weergegeven, zijn zojuist de twee buitenste moten ontkist, voorgespannen en is de uitbouwwagen verplaatst. Door de voorspanning buigt de brug enigszins op. Het gewicht van de uitbouwwagen is weergegeven als een puntlast en een moment. Doordat de (lege) kist aan de uitbouwwagen hangt, die weer is bevestigd aan de kraagarm resulteert dit in een moment.

In het plaatje ernaast is net de beton gestort in de nieuw te bouwen moten. Deze moten zijn nog niet zichtbaar. Deze vers gestorte moten bevinden zich tussen knoop 14 en 15 en tussen knoop 25 en 26. Moten worden in Bridges pas actief indien deze zijn ontkist. Actief wil zeggen dat de materiaal-eigenschappen geactiveerd worden. Duidelijk is ook te zien dat door het gewicht van de pas gestorte moot de brug vervormt.

Opgemerkt dient te worden dat in Bridges bij de ontwerp-berekening niet met een alignment wordt gewerkt. Dit is ook duidelijk te zien in de figuur hierboven, waarop de gehele brug te zien is. De ene kraagarm is al gereed, terwijl de andere nog gebouwd wordt. Alignment is niet aangebracht vanwege het feit dat dit tot zeer lastige invoer leidt met betrekking tot het hoogteverloop en de plaatsing van de moten in het x-y assenstelsel. Vandaar ook dat het vervormingsgedrag van de al gereed zijnde kraagarm een apart verloop heeft. Bij de daadwerkelijke bouw van de brug wordt de kraagarm met een bepaalde extra overhoogte gebouwd, bovenop de gewone zeeg die de brug al heeft. Bridges heeft als uitgangspunt de weergegeven horizontale lijn. In principe maakt dit niet uit, de tijdsafhankelijke vervormingen zullen niet afwijken als de bouw van de brug niet wordt gesimuleerd met een bepaald alignment. De boogwerking die nu in principe in minder mate aanwezig is, zal niet leiden tot significante verschillen in de berekening, de invloed hiervan is verwaarloosbaar.

In Bridges kunnen onder andere de volgende gegevens worden ingevoerd:

- De geometrie van de brug(delen) c.q. de moten;
- De geometrie van de voorspanning;
- Men kan opgeven wanneer:
 - een brugdeel of moot gestort wordt;
 - deze actief wordt, ofwel wanneer deze ontkist wordt;
 - voorspanning wordt gespannen en met welke voorspanverliezen en slipverliezen er rekening gehouden dient te worden;
 - ondersteuning wordt geplaatst en wanneer deze verwijderd worden. Er kan hierbij ook worden opgegeven welke veerstijfheid de ondersteuning hebben.
 - belasting wordt aangebracht en/of verwijderd. Hieronder valt onder andere het asfalt, de uitbouwagens, maar ook mobiele belasting of temperatuurbelasting.
- De materiaaleigenschappen en het verloop in de tijd van deze eigenschappen. Dit gebeurt zoals gezegd in het materialen-bestand.



Hierboven is weergegeven hoe een moot wordt gesimuleerd binnen Bridges. De gehele moot wordt bij elkaar geveegd tot een I-profiel. Vanwege het feit dat gerekend binnen voorschriften en dus ook Bridges wordt met de fictieve dikten, kan dit gedaan worden. Het krommende verloop in de ondervloer wordt lineair in Bridges ingevoerd. Een bepaalde moot wordt gesimuleerd met 2 doorsneden aan beide uiteinden van een moot. Hier tussen wordt geïnterpoleerd. De twee randdoorsneden zijn in bovenstaande figuur weergegeven. Indien men een brug in Bridges in moet voeren met men voor elke moot de afmetingen van de uiteinden van de moot invoeren. Omdat een uitbouwbrug heel vaak dubbel symmetrisch is (de beide kraagarmen zijn symmetrisch en ook de kraagarmen ten opzichte van een enkel hamerstuk is symmetrisch) hoeft dit in principe maar voor één vierde van alle moten.

Bridges kan zowel grafisch als in een tekstbestand uitvoer geven betreffende: momenten, spanningen, dwarskrachten, normaalkrachten, oplegreacties en vervormingen op elk gewenst tijdstipmoment.

2.3 Het Materialen-bestand

Binnen Bridges wordt opgegeven welk materiaal wordt gebruikt, er worden geen eigenschappen van dit materiaal binnen Bridges zelf opgegeven. Dit wordt gedaan in een apart materialen-bestand. Het aanpassen van materiaaleigenschappen en tijdsafhankelijke invloeden als krimp en kruip kan alleen hier worden gedaan.

Een typisch materialen-bestand zal er uitzien als hieronder weergegeven in figuur 2.1 en figuur 2.2.

Als eerste wordt in de file aangegeven hoeveel materialen er aanwezig zijn, vervolgens worden de gegevens van het eerste materiaal gegeven.

Dit is een B45.

Verder worden de gegevens voor het spanning-rek diagram gegeven. Er wordt hier vanuit gegaan dat beton geen enkele trek kan opnemen.

Vervolgens wordt in de file opgesomd welke E-modulus en druksterkte de beton heeft bij variërende ouderdom. Het betreft hier niet de bekende kubusdruksterkte uit de VBC. De Model Code gaat uit van een cilinderdruksterkte. Hierover meer in het volgende hoofdstuk.

```

There are 3 materials in this DataBase
Material 1
B45
For failure analysis: 3 point diagram
    strain -0.003 stress -27.0
    -0.00175 -27.0
    0.0000 0.0
For construction: MODEL 2
    Maturity: 2 days Modulus : 22489 Strength: 13.3
    Maturity: 3 days Modulus : 25640 Strength: 19.7
    Maturity: 7 days Modulus : 29655 Strength: 30.4
    Maturity: 14 days Modulus : 31694 Strength: 37.1
    Maturity: 28 days Modulus : 33127 Strength: 42.4
    Maturity: 100 days Modulus : 34834 Strength: 49.3
    Maturity: 300 days Modulus : 35734 Strength: 53.2
    Maturity: 1000 days Modulus : 36367 Strength: 56.1
    Maturity: 3000 days Modulus : 36741 Strength: 57.8
    Maturity: 10000 days Modulus : 37011 Strength: 59.1
    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 2.1 Het materialen-bestand (deel1)

Dilatancy staat voor de thermische uitzettingscoëfficiënt van de beton. Deze is gelijk aan 10^{-5} K^{-1} .

Dead weight staat vervolgens voor het soortelijk gewicht in kg/m^3 .

De cement coëfficiënt is afhankelijk van de in de beton gebruikte cementen. De waarden die aangehouden worden zijn: 1 voor normaal- en langzaamhardend cement; 2 voor snelhardend cement; 3 voor snelhardend en hoge sterkte cement.

In de tabel onder de cement coëfficiënt wordt weergegeven wat de krimp (ϵ_{s1})- en kruipcoëfficiënt (ϕ_1) is bij verschillende waarden van de relatieve vochtigheid. In de laatste kolom staat een factor waarmee de fictieve dikte vermenigvuldigd moet worden bij een bepaalde relatieve vochtigheid (λ).

Het tweede materiaal is betonstaal.

Met daarbij de tabel met de bekende waarde voor het spanningsrek diagram van FEB500, zo is ook de E-modulus van betonstaal gegeven, deze is vanzelfsprekend niet afhankelijk van ouderdom.

De uitzettingscoëfficiënt van staal is dezelfde als die van beton. En er wordt gerekend met een soortelijke massa van 7500 kg/m^3 .

Voor het derde materiaal toegepast in beton, het voorspanstaal, geldt weer een ander spanningsrek-diagram.

```

Material 2
FeB500
For failure analysis: 5 point diagram
  Strain -0.0325  stress -435.0
         -0.02175  -435.0
         0.0       0.0
         0.02175   435.0
         0.0325    435.0
For construction: MODEL 1
                  Modulus      : 200000
                  Dilatancy     : 0.000010
                  Dead weight   : 7500

Material 3
FeP1860
For Failure analysis: 5 point diagram
  Strain -0.0325  stress -435.0
         -0.02175  -435.0
         0.0       0.0
         0.007605  1521
         0.035     1690
For construction: MODEL 1
                  Modulus      : 200000
                  Dilatancy     : 0.000010
                  Dead weight   : 7500
  
```

Figuur 2.2 Het materialen-bestand (deel2)

Zoals gezegd rekent Bridges volgens de Model Code 1978 en niet volgens de nieuwe Model Code 1990. In het volgende hoofdstuk zullen de tijdsafhankelijke formuleringen volgens deze voorschriften uiteen worden gezet. Met daarbij in Bijlage A een uittreksel van de diverse voorschriften. Om het beeld compleet te maken zal ook de VBC en de Eurocode mee worden genomen.

Bij het bekijken van de voorschriften dient in het achterhoofd gehouden te worden met welke coëfficiënt nu in Bridges gevarieerd kan worden, met betrekking tot de krimp en kruip. Dit is terug te vinden in het materialen-bestand.

3 Tijdsafhankelijke factoren volgens de diverse voorschriften

3.1 Inleiding

Dit hoofdstuk heeft als doel het weergeven van de tijdsafhankelijke factoren volgens diverse voorschriften. De voorschriften die bekeken worden zijn de:

- CEB-FIP Model Code 1978
- CEB-FIP Model Code 1990
- Eurocode
- VBC

De Model Codes zijn internationaal toegepaste voorschriften, de Eurocodes zijn de voorschriften die toegepast zullen gaan worden in de landen van de EU. De VBC is het nationale voorschrift met betrekking tot betonconstructies. Deze laatste wordt zelden tot nooit toegepast bij uitbouwbruggen, maar zal hier voor de volledigheid en vergelijk wel worden weergegeven. Hierdoor kan vergeleken worden in hoeverre de VBC afwijkt van de andere voorschriften met betrekking tot de krimp- en kruipformuleringen.

In dit hoofdstuk worden de hoofdformuleringen voor de tijdsafhankelijke factoren weergegeven. Hiermee wordt de basisformule bedoeld, waarmee men bijvoorbeeld krimp- en kruipvervorming uitrekent. De formules en de coëfficiënten die bij deze formules horen worden hier niet uitgeschreven, dit is in Bijlage A gedaan. De reden dat hier alleen de hoofdformuleringen zijn weergegeven is dat er zo nog redelijk overzicht gehouden kan worden met betrekking tot de manier waarop de diverse voorschriften omgaan met de formuleringen van de tijdsafhankelijke factoren.

3.2 CEB-FIP Model Code 1978

De CEB-FIP Model Code voor betonconstructies is voor het eerst gepubliceerd in 1978 in samenwerking van het Comité Euro-International du Béton en de Fédération Internationale de la Précontrainte.

De Model Code 1978 berekent de tijdsafhankelijke vervormingen als sommatie van de onderstaande vervormingen:

- Elastische vervormingen
- Vertraagd elastische vervormingen
- Omkeerbare kruip
- Onomkeerbare kruip
- Krimpvervorming
- Thermische vervorming.

In formule A.1.1 uit Bijlage A wordt dit als volgt weergegeven:

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_{ci}(t_0) + \varepsilon_{cc}(t) + \varepsilon_{cs}(t) + \varepsilon_{cT}(t)$$

$$= \varepsilon_{co}(t) + \varepsilon_{cn}(t)$$

Hierin is:

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

Kruip

In de kruipfunctie worden vaak zowel de elastische- als de kruipvervormingen meegenomen, zo ook in de MC78. De spanningsafhankelijke vervormingen wordt als volgt geformuleerd:

$$\varepsilon_{cs}(t, t_0) = \sigma_0 \cdot J(t, t_0)$$

Hierin stelt $J(t, t_0)$ de 'kruipfunctie' voor

De kruipfunctie wordt bepaald door middel van de volgende functie:

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

In deze formule staan de diverse sommaties voor:

- $\frac{1}{E_c(t_{0,c})}$ de elastische vervormingen (de initiële belastingvervorming)
- $\frac{\beta_a(t_{0,c})}{E_{c,28}}$ de vertraagd elastische vervormingen
- $\frac{\varphi_d \cdot \beta_d(t_c - t_{0,c})}{E_{c,28}}$ de omkeerbare kruip
- $\frac{\varphi_f \cdot (\beta_f(t_c) - \beta_f(t_{0,c}))}{E_{c,28}}$ de onomkeerbare kruip

De basis kruipcoëfficiënt die in Bridges in het materialen-bestand (hoofdstuk 2.3) aan te passen is, is de factor φ_f in de formulering van de onomkeerbare kruip.

Krimp

De krimpvervorming is als volgt geformuleerd:

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

Hierin is ε_{s0} de basis krimpcoëfficiënt die in het materialen-bestand van Bridges aan te passen is.

3.3 CEB-FIP Model Code 1990

De Model Code '90 is de opvolger van de Model Code 1978. Dit voorschrift beschrijft de totale rek $\varepsilon_c(t)$ op tijdstip t , van een betonnen element dat belast wordt op tijdstip t_0 met een constante spanning $\sigma_c(t_0)$ net als de MC78:

$$\begin{aligned} \varepsilon_c(t) &= \varepsilon_{ci}(t_0) + \varepsilon_{cc}(t) + \varepsilon_{cs}(t) + \varepsilon_{cT}(t) \\ &= \varepsilon_{cs}(t) + \varepsilon_{cn}(t) \end{aligned}$$

Hierin is:

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

Kruip

De spanningsafhankelijke rek, waarin de krimprek en de elastische rek (initiële belastingrek) samengevoegd zijn, is als volgt gedefinieerd: $\varepsilon_{cs}(t, t_0) = \sigma_c(t_0) \cdot J(t, t_0)$ (zie ook Bijlage A.2).

De kruipfunctie $J(t, t_0)$ bestaat uit:

$$J(t, t_0) = \frac{1}{E_c(t_0)} + \frac{\phi_0 \cdot \beta_c(t - t_0)}{E_c(28)}$$

Hierin is ϕ_0 de basis kruipcoëfficiënt, echter is in deze formuleringwijze niet meer terug te vinden wat nu de vertraagd elastische vervormingen en de on- en omkeerbare kruipvervormingen zijn, zoals dit gebeurde in de Model Code 1978.

Krimp

De krimp wordt berekend met: $\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cs0} \cdot \beta_s(t - t_s)$.

Hierin is ε_{cs0} de basiskrimpcoëfficiënt die te vergelijken valt met die van de MC78

3.4 Eurocode

De Eurocode is het nieuwe internationale voorschrift voor de EU-landen. De formuleringen die de Eurocode aanhoudt zijn hetzelfde als die van de CEB-FIP Model Code 1990, zie ook bijlage A.3. De tijdsafhankelijke vervormingen volgens dit voorschrift zullen dan ook niet verder besproken worden.

3.5 VBC 1995 - NEN 6720

De VBC is het Nederlandse betonvoorschrift. De formuleringen van de VBC zijn in de Bijlage aangevuld met de CUR-aanbevelingen voor hogesterkte beton. Er bestaan ook voorstellen tot aanpassing van de genoemde CUR-aanbeveling. Deze zijn binnen dit afstudeeronderzoek niet toegepast, behalve als dit expliciet vermeld is. Indien binnen dit afstudeeronderzoek gesproken wordt over de VBC, worden de formuleringen van de VBC bedoeld, met de aanvulling van de CUR-aanbeveling.

Aangezien dat de VBC niet werkt met een in de tijd ontwikkelende sterkte- en E-modulus zijn de formuleringen een stuk eenvoudiger dan die van de Model Codes.

Kruip

De kruipvervorming, inclusief de elastische vervormingen kunnen met de volgende vergelijking bepaald worden:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E'_b} \cdot (1 + \phi), \text{ de kruipcoëfficiënt wordt als volgt geformuleerd: } \phi = k_c \cdot k_d \cdot k_b \cdot k_h \cdot k_t \leq \phi_{\max}$$

De factor k_c , welke afhankelijk is van de relatieve vochtigheid, kan men beschouwen als de basiskruipcoëfficiënt welke vergelijkbaar is met ϕ_R in het materialen-bestand van Bridges.

Voor een volledige toelichting van de factoren wordt verwezen naar Bijlage A.4.

Krimp

De krimp wordt als volgt beschreven: $\varepsilon'_r = \varepsilon'_c \cdot k_b \cdot k_h \cdot k_p \cdot k_t < \varepsilon'_{\max}$

Hierin is ε'_c de basis krimpcoefficiënt.

4 Vergelijking van de voorschriften

4.1 Inleiding

In het vorige hoofdstuk zijn de krimp- en kruipformuleringen gegeven die gelden volgens de diverse voorschriften. Er is duidelijk te zien dat de diverse voorschriften de krimp- en kruipformuleringen op een geheel andere wijze benaderen. Waar de verschillen in de formuleringen zitten en tot welke verschillen dit leidt in de uiteindelijke krimp- en kruipvervormingen, zal onderzocht worden in dit hoofdstuk.

Het is belangrijk de verschillen in de voorschriften te kennen, niet alleen de verschillen in de formuleringen (de parameters) maar ook de verschillen in de uiteindelijke vervormingen. Hiermee kan in een later stadium veel worden verklaard.

Als eerste zal hier onder worden weergegeven welke parameters terug te vinden zijn in de voorschriften. Na het bekijken van het vorige hoofdstuk en Bijlage A, is duidelijk geworden dat sommige parameters in het ene voorschrift niet voorkomen en in het andere wel. Om nu in een later stadium te weten met welke parameters gestuurd kan worden, zijn deze in onderstaand overzicht gerangschikt.

	Kruip	Krimp	MC 1978	MC 1990	VBC
Betonklasse (B..)	X	X	x	x	X
het cementtype: langzaamhardend cement,	X	X	X	X	x
normaal- en snelhardend cement					
of snelhardend en hogesterkte cement					
de relatieve vochtigheid van de omgeving [%]	X	X	X	X	X
de fictieve dikte van de constructie (h, h_m)	X	X	X	X	X
het tijdstip van ontkisten		X	X	X	
het tijdstip, na het storten, waarop de constructie belast wordt. (t_0)	X		X	X	X
de constant aanwezige temperatuur na belasting van de constructie, afwijkend van 20°C	X	X	X	X	
de constant aanwezige temperatuur voor belasting van de constructie, afwijkend van 20°C	X			X	
het laagste wap.percentage van de totale hoogte in de doorsnede voorkomende langswapening op de totale hoogte van de doorsnede.		X			X

Overzicht 4.1 Invoerparameters voor de krimp- en kruipformuleringen

Opm.: In de Model Codes komt de betonklasse niet expliciet voor. De betonklasse wordt enkel in de ontwikkeling van de E-modulus gebruikt en wordt verder gebruikt voor het weergegeven van de mate van verharding. Dit laatste gebeurt aan de hand van een verhouding van druksterkte op een bepaald tijdstip ten opzichte van einddruksterkte. De betonklasse komt niet op een manier voor zoals deze bekend is in de VBC, wel wordt gewerkt met het cementtype. Deze komt in mindere mate in de VBC voor (k_d). Indien naar de formules van de voorschriften gekeken wordt zal het een en ander duidelijker worden.

In de volgende paragrafen worden de verschillen tussen de voorschriften onderzocht met betrekking tot de krimp- en kruipvervormingen. Dit is gedaan voor het conventionele grindbeton (B45) en het 'nieuwere' materiaal hogesterktebeton (B85). Er is bewust gekozen voor deze twee uiteenlopende sterkteklassen. Hierdoor kan goed onderzocht worden hoe het oudere voorschrift, de Model Code 1978, presteert bij hoge sterkteklassen. Dit onderzoek beperkt zich vooralsnog tot vergelijking met de andere voorschriften. In een later stadium van dit afstudeerrapport zal ook nog een vergelijking gemaakt worden met gemeten waarden (praktijk- en laboratorium-onderzoeken).

Opgemerkt dient te worden waar in dit hoofdstuk gesproken wordt over kruipvervorming, wordt de vervorming ten gevolge van kruip samen met de elastische vervorming bedoeld.

Er is bewust gekozen om de kruipvervorming te vergelijken en niet de kruipfactor ϕ , in verband met het feit dat de elasticiteitsmodulus volgens de diverse voorschriften op een volledig andere wijze benaderd wordt en tot verschillende resultaten leidt. Hierom is dan ook de elastische vervorming meegenomen samen met de vervorming tengevolge van de krimp.

Zie voor het verschil van de formuleringen Hoofdstuk 3 en Bijlage A.

4.2 Grindbeton

Zoals gezegd zullen als eerste de krimp- en kruipformuleringen onderzocht worden met als uitgangspunt grindbeton (B45). Er zal een vergelijk gemaakt worden naar de kruipvervorming volgens de diverse voorschriften en vervolgens een vergelijk naar de krimpvervorming. Voor de formuleringen van de diverse voorschriften wordt wederom verwezen naar Bijlage A.

4.2.1 Vergelijking kruipvervorming

Ten eerste dient opgemerkt te worden dat het hier de vervorming ten gevolge van kruip en de elastische vervormingen betreft. Er is bewust gekozen om de elastische vervormingen tegelijk met de vervormingen ten gevolge van kruip mee te nemen. Een apart vergelijk naar de elastische vervormingen volgens de diverse voorschriften zou leiden tot een onoverzichtelijk geheel van vergelijkingen en conclusies. Verdere aanleiding hiertoe is dat de elastische vervormingen volgens de Model Codes direct onder het onderdeel kruip genoemd worden, dit in tegenstelling tot de VBC. Hierdoor kan het samenvoegen van kruip en elastische vervormingen verwarrend lijken voor diegenen die kruipformuleringen volgens de VBC gewend zijn.

Ten tweede dient opgemerkt te worden dat er hier gekozen is om kruipvervorming weer te geven in de diverse grafieken. Een reden hiervoor is dat krimp ook in vervormingen (ϵ) wordt weergegeven. Een andere belangrijkere reden is dat kruip veelal wordt weergegeven als kruipfactor. Dit is zoals eerder genoemd hier niet mogelijk, vanwege het feit dat de modellering van elasticiteitsmodulus in de diverse voorschriften sterk uiteenloopt. Echter om tot een vervorming te komen, dient de kruipformulering (de kruipfunctie J) vermenigvuldigd te worden met een spanning (σ). Hiertoe is een eenheidsspanning σ van 1 N/mm² gekozen.

Ter verduidelijking van het bovenstaande de kruipvervorming (incl. elastische vervorming) volgens de VBC:

$$\epsilon = \sigma \cdot \frac{(1+\phi)}{E'b} \quad \text{Hierin is de kruipfunctie (J): } J = \frac{(1+\phi)}{E'b}$$

Vergelijken we dit nu met de kruipvervorming volgens de Model Code 1990, dan blijkt al snel dat het vergelijken van alleen de vervorming ten gevolge van kruip niet mogelijk is.

$$\epsilon = \sigma \cdot \left[\frac{1}{E_{(t_0)}} + \frac{\phi}{E_{28}} \right], \quad \text{waarin } E_{(t_0)} \text{ de elasticiteitsmodulus is op het tijdstip van belasten en}$$

E_{28} is de elasticiteitsmodulus na 28 dagen.

Na deze toelichting kan met het daadwerkelijke vergelijk van de voorschriften begonnen worden. Voor een reëel vergelijk moeten reële waarden gekozen worden voor de variabelen in Overzicht 4.1.

Er is gekozen voor waarden die bij een uitbouwbrug horen, te weten:

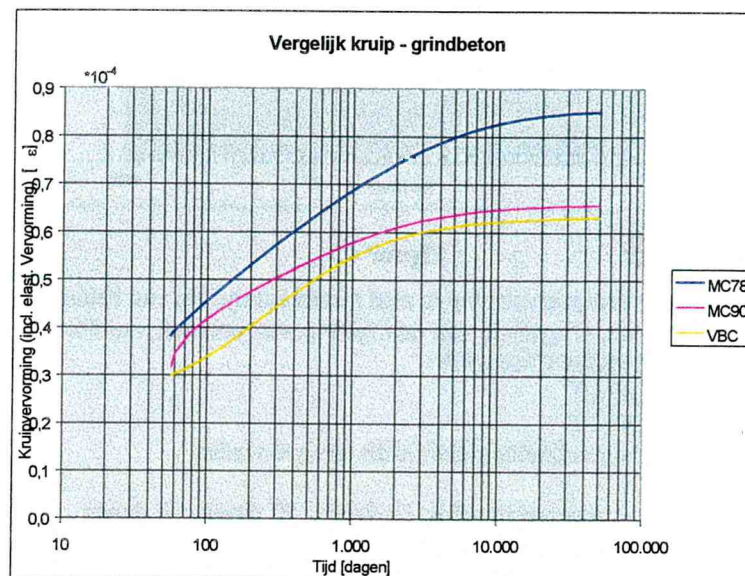
Betonkwaliteit:	B45
Relatieve vochtigheid:	75%
Fictieve dikte:	400 mm.
Belastingtijdstip:	56 dagen na storten
Constante omgevingstemperatuur	
voor en na storten:	10,4 °C (gemiddelde Nederlandse jaartemperatuur)
Cementtype:	Normaalhardend cement

Er wordt hier niet aan een constructie gerekend. De hierboven genoemde waarden worden simpelweg in de formules ingevuld.

Voor de bepaling van de fictieve dikte wordt verwezen naar de bijlagen. Uit eerder onderzoek van andere afstudeerders is gebleken dat een fictieve dikte van 400 mm een zeer reële keuze is.

Het belastingtijdstip is gesteld op 56 dagen na storten. In principe wordt een moot in de brug al na drie dagen belast. Dan wordt de kist gelost en de voorspanning aangebracht. Echter een week later komt er het gewicht van de volgende moot bij en de week daarna weer van de daaropvolgende moot, enz. Ook wordt na verloop van tijd de brug gesloten en de continuïteitsvoorspanning aangebracht en weer later het asfalt. Het duurt enige tijd voor de spanningen zo hoog zijn opgelopen, dat van enige kruipvervorming van betekenis kan worden gesproken. Voor het vergelijk van de voorschriften is daartoe gekozen voor een belastingtijdstip van 56 dagen, oftewel 8 weken oftewel 2 maanden.

In de onderstaande grafiek (Figuur 4.1) is de kruipvervorming (incl. de elastische vervorming) op basis van de voorgenoemde waarden weergegeven voor een fictief voorbeeld puur ter vergelijking van de voorschriften.



Opm.:
10.000 dagen
≈ 30 jaar.

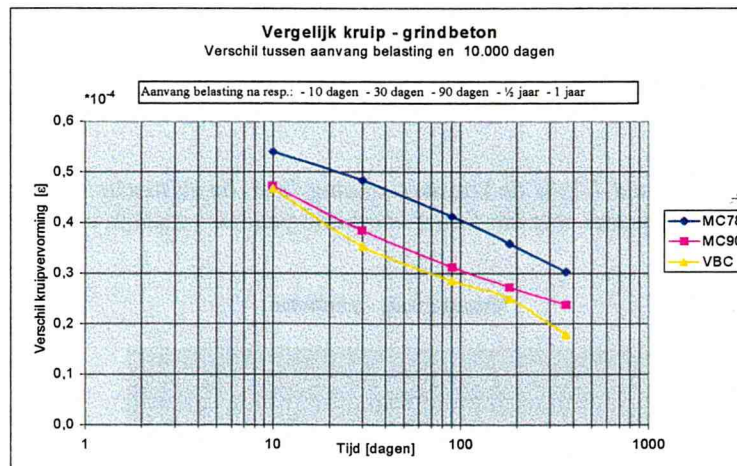
Figuur 4.1

In veel berekeningen, zo ook in het computerprogramma Bridges, wordt $t = \infty$, gelijk gesteld aan 10.000 dagen. Ofwel het tijdstip waarbij er vanuit gegaan wordt dat dan alle tijdsafhankelijke factoren uitgewerkt zijn. De tijdsas in de bovenstaande en navolgende figuren is doorgetrokken (vanwege de logaritmische schaal tot 100.000 dagen, ofwel 300 jaar). Wat duidelijk wordt is dat de kruipvervorming volgens de Model Code 1990 en de VBC wel na 10.000 dagen gelijk blijft, echter bij de Model Code 1978 blijft deze nog langere tijd toenemen. Wat aangeeft, net als wat andere afstudeerders concludeerden (zie de *Voorstudie*), dat het onjuist is om aan te nemen dat het eind van de tijdsafhankelijke vervorming na ongeveer 30 jaar bereikt is. In ieder geval wat betreft de Model Code 1978.

Wat opvalt is dat de Model Code 1978 een veel grotere kruipvervorming geeft als de VBC en de Model Code 1990. Het is ook opvallend dat de VBC en de MC90 zo weinig verschillen.

Opgemerkt dient te worden, dat het bij een berekening gaat om het verschil van de kruipvervorming in het tijdsinterval tussen het tijdstip van belasten en een eindtijdstip. Het is verleidelijk om te concluderen dat de MC78 een hogere eind-kruipvervorming heeft, echter deze begint ook hoger dan de andere twee voorschriften. Een beter vergelijk zou zijn om het verschil van de kruipvervorming tussen het tijdstip van belasten en bijvoorbeeld 10.000 dagen, in een figuur weer te geven.

Dit is in de onderstaande figuur gedaan. In deze figuur is verder nog gevarieerd met de aanvangstijdstippen van de belasting. Want over het eerder genoemde (reële) tijdstip van belasten van 56 dagen valt te twisten. In onderstaande figuur zijn dan ook andere tijdstippen toegevoegd.



Figuur 4.2

In de figuur is het verschil van de kruipvervorming te zien tussen het tijdstip van belasten en 10.000 dagen. De waarden zijn als volgt berekend. Uitgaande van een tijdstip van belasten van 56 dagen, zoals dat in Figuur 4.1 is toegepast levert dit voor de Model Code 1978:

- op tijdstip 56 dagen: $\sim 0,39 \cdot 10^{-4}$
- op $t = 10.000$ dagen: $\sim 0,86 \cdot 10^{-4}$

Een verschil van $0,45 \cdot 10^{-4}$. In de bovenstaande figuur is dit terug te vinden.

Voor de tijdstippen van belasten van respectievelijk 10 dagen, 30 dagen, 90 dagen, $\frac{1}{2}$ jaar en een jaar zijn de berekeningen van Figuur 4.1 en de berekening van hierboven opnieuw uitgevoerd en hebben geleid tot Figuur 4.2.

Er blijkt dat de Model Code 1978 voor elk tijdstip van belasten een hogere kruipvervorming geeft en dat de VBC en de MC 90 nagenoeg gelijk zijn. Zoals gezegd om te kunnen concluderen welk voorschrift de juiste resultaten geeft zal eerst een vergelijk gemaakt moeten worden met laboratorium en praktijk proeven. Dit zal in een later hoofdstuk gedaan worden.

4.2.2 *Vergelijking krimpvervorming*

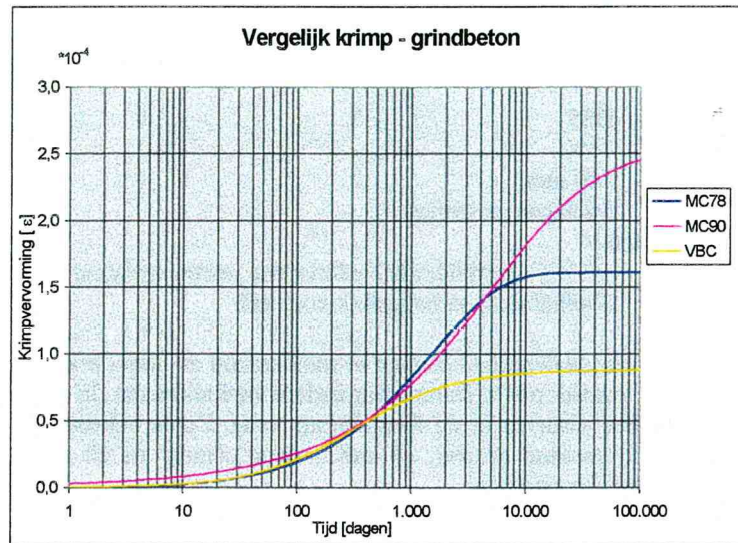
Ook hier wordt gekozen voor realistische variabelen in overzicht 4.1. Er wordt voor gekozen dat bij een uitbouwbrug in grindbeton geldt dat:

Betonkwaliteit:	B45
Relatieve vochtigheid:	75%
Fictieve dikte:	400 mm.
Constante omgevingstemperatuur	
voor en na storten:	10,4 °C (gemiddelde Nederlandse jaartemperatuur)
Cementtype:	Normaalhardend cement
Tijdstip van ontkisten:	3 dagen
Laagste wap.percentage:	2 %.

Het tijdstip van ontkisten is van belang, vanwege het feit dat de beton kan krimpen zodra de kist verwijderd is. Het geeft niet alleen aan wanneer krimp begint, maar meteen bij welke ouderdom. Indien een constructie na langere tijd ontkist wordt heeft de beton een grotere ouderdom en zal in de resterende levensduur minder krimpen. Voor de precieze invloed wordt wederom naar Bijlage A verwezen.

Zoals in overzicht 4.1 te zien is, is het laagste wapeningspercentage alleen bij de VBC van belang. Dit is het enige voorschrift dat rekening houdt met de invloed die wapening heeft op het krimpgedrag. Er is hier gekozen voor een minimum wapeningspercentage van 2%. Gekeken naar de praktijk een reëel percentage.

De krimpvervorming die volgens de diverse voorschriften optreedt bij bovengenoemde waarden is in de onderstaande figuur weergegeven.



Opm.:
10.000 dagen
≈ 30 jaar.

Figuur 4.3

Ook hier is de tijdsas groter gekozen dan de gebruikelijke 10.000 dagen. Wat opvalt is dat de krimpvervorming volgens de Model Code 1990 geen asymptoot bereikt, zelfs niet na 300 jaar (!). Een dergelijke formulering van de krimpvervorming lijkt niet realistisch. Verwacht mag worden dat krimpvervormingen na een bepaalde ouderdom geen invloed meer hebben. De grootte van de krimpvervorming bij de Model Code 1978 en de 1990 verschilt niet veel bij het tijdstip van 10.000 dagen. De VBC blijft duidelijk achter ten opzichte van de andere twee voorschriften. Ook deze VBC krijgt na 10.000 dagen een asymptotisch verloop, wat erop duidt dat met verdere krimpvervorming geen rekening wordt gehouden.

4.3 Hoge sterkte beton

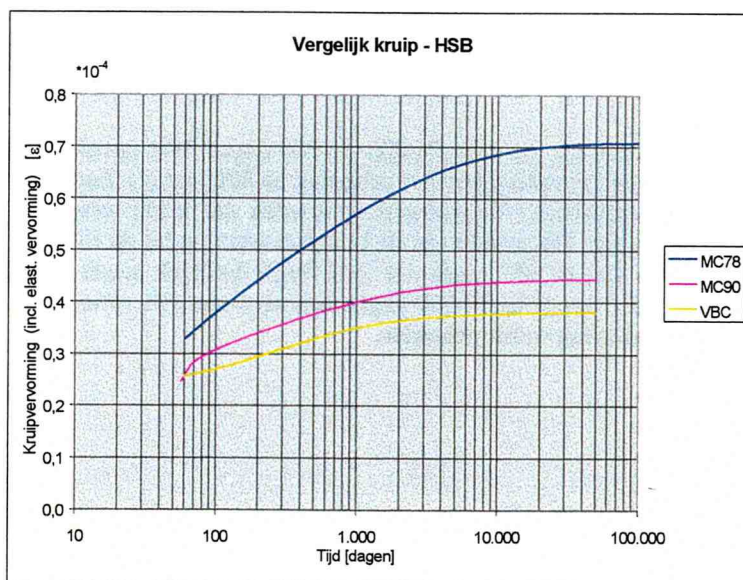
Na het vergelijken van de voorschriften met grindbeton (B45), is nu hogesterkte beton (B85) aan de beurt. De opbouw van de vergelijkingen en de grafieken zal hetzelfde verlopen als hiervoor.

4.3.1 Vergelijking kruipvervorming

De variabelen bij B85 wijken alleen op de betonkwaliteit en het cementtype af. Het overzicht van de variabelen is als volgt:

Betonkwaliteit:	B85
Relatieve vochtigheid:	75%
Fictieve dikte:	400 mm.
Belastingtijdstip:	56 dagen na storten
Constante omgevingstemperatuur	
voor en na storten:	10,4 °C (gemiddelde Nederlandse jaartemperatuur)
Cementtype:	Snelhardend en hogesterktecement

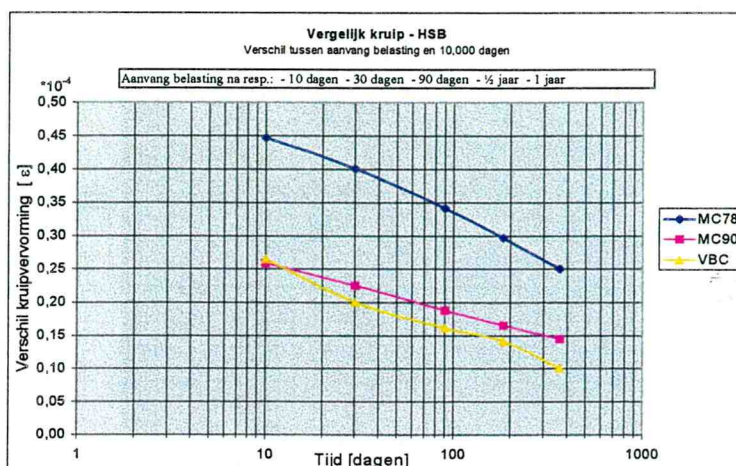
Het cementtype is veranderd van normaalhardend cement in snelhardend en hogesterkte cement. Dit is met name in de Model Code 1978 de enige manier om te sturen naar andere sterkteklassen. In de Model Code 1990 komt de sterkteklasse op nog wat andere plaatsen in de formulering terug. Zoals bekend kan alleen keuze worden gemaakt uit normaal- en langzaamhardend cement, uit snelhardend cement en uit snelhardend en hogesterkte cement. B85 past het beste in de laatste categorie.



Figuur 4.4

Het feit dat het cementtype het enige 'stuurmiddel' is in de MC 78, verklaart waarschijnlijk waarom dit voorschrift zo sterk afwijkt van de andere twee.

In de onderstaande figuur is wederom gevarieerd met het belastingtijdstip.



Figuur 4.5

Er is hier, net als bij het vergelijking van grindbeton, de resterende kruipvervorming (incl. elastische vervorming) weergegeven vanaf het tijdstip van belasting tot 10.000 dagen.

Ook hier valt te zien dat de vervorming afneemt bij toenemende ouderdom van beton.

In vergelijking met Figuur 4.2 is ook duidelijk te zien dat hogesterkte beton minder kruipvervorming heeft dan grindbeton.

De waarden bij een belastingtijdstip van 10 dagen voor de MC90 en de VBC waren in Figuur 4.2 ongeveer $0,48 \cdot 10^{-4}$. Bij een belastingtijdstip van 1 jaar was dit $0,24 \cdot 10^{-4}$ bij de MC90 en voor de VBC was dit $0,18 \cdot 10^{-4}$.

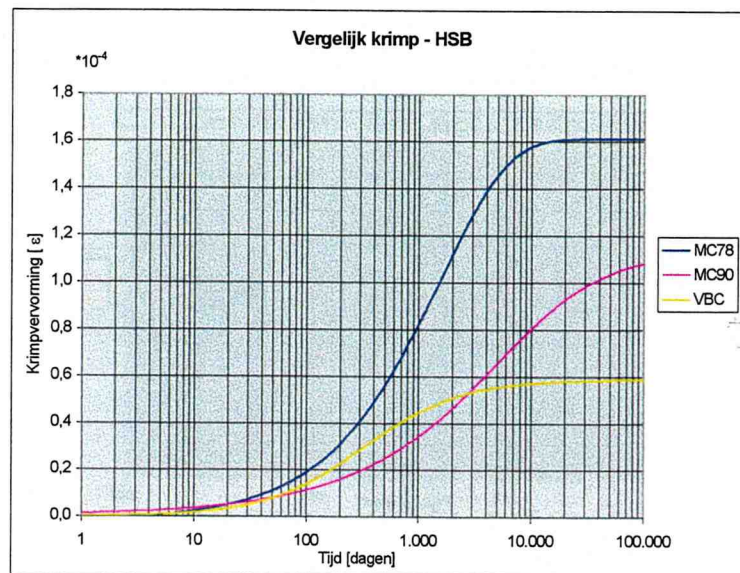
De kruipvervorming neemt bij de Model Code 1978 veel minder af bij de hogesterkte beton. Bij grindbeton was het verschil in kruipvervorming bij een belastingtijdstip van 10 dagen $0,53 \cdot 10^{-4}$. Bij een jaar was dit $0,3 \cdot 10^{-4}$. De Model Code 1978 heeft dus in vergelijking met de twee andere voorschriften een vele kleinere afname in kruipvervorming.

4.3.2 Vergelijking krimpvervorming

Er is hier van de zelfde uitgangspunten uitgegaan als bij het vergelijking van de krimpvervorming van grindbeton. Het verschil is de sterkteklasse met het daarbij horende cementtype. De figuur is weergegeven op de volgende pagina.

De variabelen uit Overzicht 4.1 zijn:

Betonkwaliteit:	B85
Relatieve vochtigheid:	75%
Fictieve dikte:	400 mm.
Constante omgevingstemperatuur	
voor en na storten:	10,4 °C (gemiddelde Nederlandse jaartemperatuur)
Cementtype:	Snelhardend en hogesterktecement
Tijdstip van ontkisten:	3 dagen
Laagste wap.percentage:	2 %.



Figuur 4.6

Net als bij het vergelijken van de voorschriften bij grindbeton, valt ook hier op dat de Model Code 1990 zelfs na 300 jaar geen asymptoot bereikt. Dit is erg opvallend, mede doordat de Model Code 1978 en de VBC een asymptoot bereiken na 10.000 dagen.

De Model Code 1978 heeft net als bij het vergelijken van de kruip, ook bij de krimp een hele grote afwijking ten opzichte van de andere twee voorschriften (bij 10.000 dagen). De waarden van de krimpvervorming verschillen niet voor B45 of B85. Bij beiden sterkteklassen is de krimpvervorming in dit fictieve voorbeeld ongeveer $1,6 \cdot 10^{-4}$. In de Model Code 1978 zit binnen de krimpformuleringen dan ook geen parameter die beïnvloed kan worden door de sterkteklasse of cementklasse. Het lijkt erg onwaarschijnlijk dat in praktijk de krimp niet wordt beïnvloed door de betonklasse.

De vermindering van krimp bij B85 ten opzichte van B45 is (bij $t=10.000$ dagen) voor de Model Code 1990 ongeveer 50%. Voor de VBC is dit ongeveer 25%.

Welk voorschrift nu in de praktijk het beste presteert is, zoals gezegd, in een later stadium van dit afstudeeronderzoek terug te vinden.

4.4 Temperatuureffect Model Code 1990

In de beschrijving van de voorschriften in Bijlage A kan bij de Model Code 1990 voor zowel de krimp als kruipformulering een extra temperatuureffect in rekening worden gebracht. Zie hiervoor formules A.2.21 t/m A.2.27 voor de kruip en formules A.2.34 t/m A.2.36 voor de krimp.

In de praktijk worden deze formules zelden gebruikt. In de Nederlandse situatie hoeven de formules A.2.25 en A.2.26 sowieso niet gebruikt te worden.

Bij de kruip is dit een temperatuurscorrectie op de tijdontwikkeling van de kruip en de kruipcoëfficiënt. Dit is niet hetzelfde als de normale temperatuurscorrectie. De normale temperatuurscorrectie wordt in rekening gebracht door middel van een gecorrigeerde leeftijd van het beton. Bij de krimp geldt een zelfde soort temperatuurscorrectie, die niet hetzelfde is als de correctie door middel van de gecorrigeerde leeftijd.

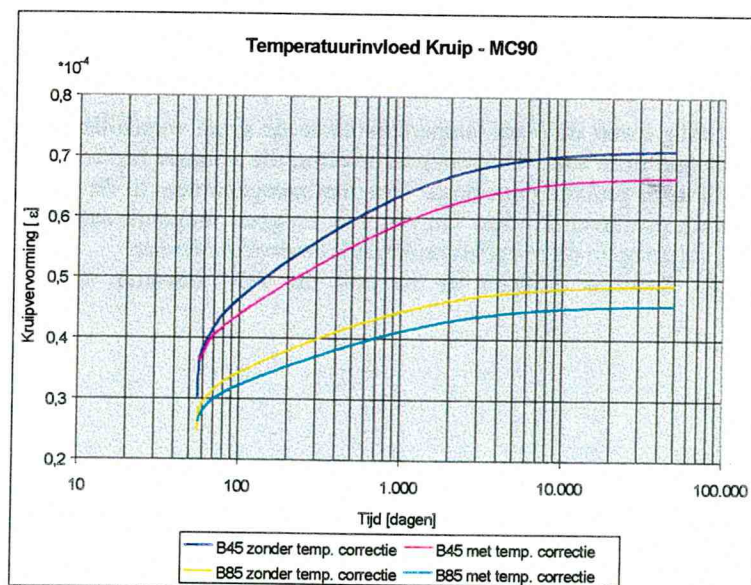
De twee formules die hierboven genoemd worden, welke niet voor de Nederlands situatie van toepassing zijn, hebben betrekking op een toename van de temperatuur boven de 20°C. De andere formules dienen wel toegepast te worden, echter wordt dit in de praktijk veelal niet gedaan.

Of het niet gebruiken van een dergelijke temperatuurscorrectie in de krimp- en kruipformulering tot grote verschillen leidt, zal in deze paragraaf onderzocht worden. Dit onderzoek wordt gedaan met twee sterkteklassen, te weten B45 en B85. Er worden verder de zelfde parameters toegepast als in de voorgaande paragrafen.

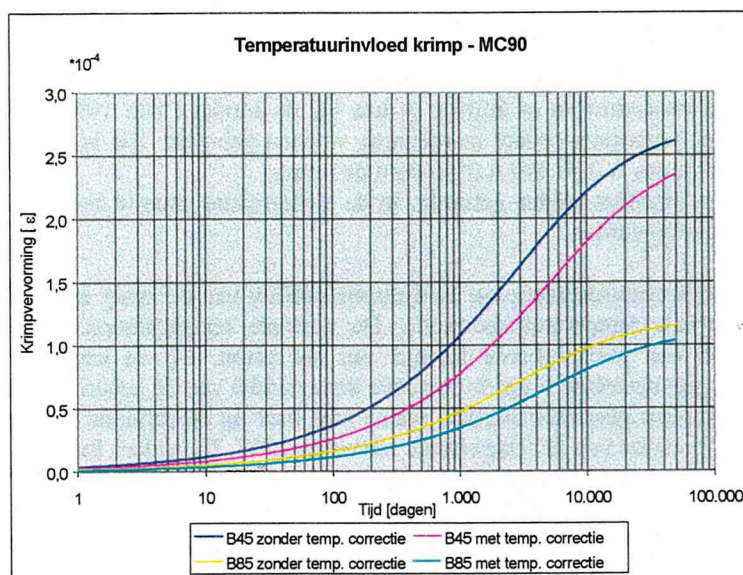
De parameters zijn voor de krimpvervorming en de kruip-(incl. elastische) vervorming:

Betonkwaliteit:	B45 c.q. B85
Relatieve vochtigheid:	75%
Fictieve dikte:	400 mm.
Belastingtijdstip:	56 dagen na storten
Constante omgevingstemperatuur	
voor en na storten:	10,4 °C (gemiddelde Nederlandse jaartemperatuur)
Tijdstip van ontkisten:	3 dagen
Cementtype:	Normaalhardend cement c.q. Snelhardend en Hogesterkte cement

In de grafieken wordt er onderscheid gemaakt tussen 'met temp. correctie' en 'zonder temp. correctie'. Bij deze laatste, zit vanzelfsprekend wel de temperatuurscorrectie ten aanzien van de gecorrigeerde ouderdom.



Figuur 4.7 Variatie kruipvervorming dmv extra temp. correctie



Figuur 4.8 Variatie krimpvervorming dmv extra temp. correctie

De temperatuurcorrectie van 20°C naar 10°C heeft dus duidelijk tot gevolg dat zowel de vervormingen van de krimp en kruip minder zijn. Bij de kruipvervorming (incl. elastische vervorming) is wederom gerekend met een eenheidsbelasting van 1 N/mm². Dit om tot een vergelijk te kunnen komen betreffende de vervormingen. Zowel de krimp als kruip is op de tijdsas verder doorgezet dan de gebruikelijke 10.000 dagen om duidelijk te maken dat de kruipvervorming wel op dit tijdstip zijn eindwaarden heeft bereikt, maar dat de krimpvervorming ongeacht de hoge ouderdom toch nog krimpt.

Kijkend naar figuur 4.7 en 4.8 blijkt dat de toepassing van de extra temperatuurcorrectie nog een redelijke invloed heeft. Indien wordt verondersteld dat de toepassing leidt tot de meest reële waarden en wordt gekeken naar de afwijkingen van de vervormingen zonder extra temperatuur correctie leidt dit tot de volgende afwijkingen:

- Bij de kruipvervorming is de afwijking bij 10.000 dagen voor B45: 6,8 %
- Bij de kruipvervorming voor B85: 7,4 %
- Bij de krimpvervorming is de afwijking bij 10.000 dagen voor B45: 21,4 %
- Bij de krimpvervorming voor B85: 21,4 %

Vooral bij de krimpvervorming levert de extra temperatuurcorrectie grote verschillen op. Het dient dan ook de aanbeveling om te rekenen met deze extra temperatuurcorrectie, die volgens het voorschrift dan ook verplicht wordt gesteld. Echter wordt in de praktijk deze nogal eens niet meegenomen. In dit afstudeeronderzoek zal dan ook altijd met deze correctie gerekend worden. Dit om een zo goed mogelijk aan te sluiten op praktijk- en laboratorium metingen die verderop in dit afstudeeronderzoek besproken worden.

De Model Code 1978 en daarmee Bridges en zo ook de VBC bevatten niet een dergelijke (extra) temperatuurcorrectie.

5 Bridges en de voorschriften

5.1 Inleiding

In Hoofdstuk 2 is duidelijk geworden dat er aan de sturing van de krimp en kruip in Bridges weinig te doen valt. In principe kan alleen gesleuteld worden aan de basis krimp- en kruipcoëfficiënten. Echter zijn de basiscoëfficiënten in de MC90 en de VBC duidelijk anders gedefinieerd dan in de MC78.

De Model Code 1978 maakt met betrekking tot de kruip onderscheid tussen de vertraagd elastische vervormingen, de on- en omkeerbare kruipvervorming. De basis kruipcoëfficiënt is onderdeel van de onomkeerbare kruip.

In de andere twee voorschriften is dit onderscheid niet aanwezig, en is de basiskruipcoëfficiënt een onderdeel van kruipfactor ϕ . Dit alles terug te vinden in Hoofdstuk 3 en Bijlage A.

De basiskruipfactor in de Model Code 1978 (ϕ_f) en dus ook in Bridges is als volgt terug te vinden in de kruipformulering:

$$\varepsilon_{cs}(t, t_0) = \sigma_0 \cdot \left[\frac{1}{E_c(t_{0,c})} + \frac{\beta_a(t_{0,c})}{E_{c,28}} + \frac{\phi_d \cdot \beta_d(t_c - t_{0,c})}{E_{c,28}} + \frac{\phi_f \cdot (\beta_f(t_c) - \beta_f(t_{0,c}))}{E_{c,28}} \right]$$

In bijvoorbeeld de Model Code 1990 is dit (ϕ_0) in de volgende formules:

$$\varepsilon_{cs}(t, t_0) = \sigma_c(t_0) \cdot \left[\frac{1}{E_c(t_0)} + \frac{\phi(t, t_0)}{E_{ci}} \right] \text{ met } \phi(t, t_0) = \phi_0 \cdot \beta_c(t - t_0)$$

Duidelijk mag zijn dat dit een formulering is die op andere uitgangspunten gebaseerd is. De basiscoëfficiënten zijn hieronder voor de volledigheid weergegeven zoals ze in de diverse voorschriften zijn gegeven.

	Basis kruip-coëfficiënt	Basis krimp-coëfficiënt
Model Code 1978	ϕ_f	ε_{s1}
Model Code 1990	ϕ_0	ε_{cs0}
VBC	k_c	ε'_c

De wijze waarop deze coëfficiënten bepaald worden en op welke wijze ze in de formuleringen terug komen is terug te vinden in Bijlage A.

In dit hoofdstuk zal bekeken worden of met Bridges dezelfde berekeningsresultaten bereikt worden als met een handberekening. Overeenstemming zal alleen bereikt worden met de Model Code 1978, vanwege het feit dat Bridges alleen volgens dit voorschrift rekent.

De berekening zal worden uitgevoerd aan een eenvoudige uitkragende ligger, een dergelijk model is nog redelijk eenvoudig met de hand te berekenen.

Er is gebleken dat in de praktijk bij berekening met Bridges gerekend is met de basiskrimp en kruipcoëfficiënten volgens de Model Code 1990. Dit in de verwachting dat daarmee een betere benadering van de werkelijkheid zou worden bereikt dan met die van de Model Code 1978. Duidelijk mag zijn dat dit een onjuiste benadering is. In hoeverre deze coëfficiënten afwijken van de MC78 en in hoeverre dit leidt tot grote fouten zal in dit hoofdstuk onderzocht worden.

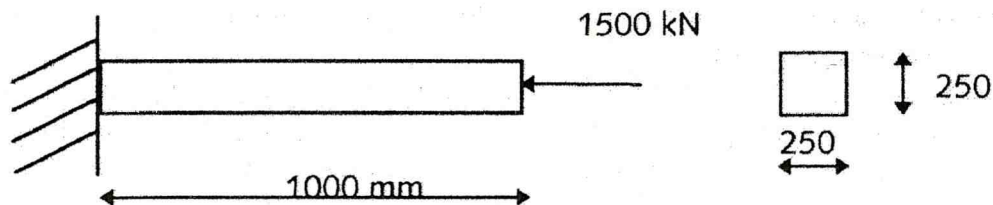
Verder zal in dit hoofdstuk onderzocht worden of het mogelijk is om toch met de Model Code 1990 in Bridges te rekenen. Dit is zeer wenselijk, mede om te gebruiken bij onderzoek wat in dit afstudeerrapport nog gedaan moet worden.

Nu zal eerst Bridges met de voorschriften vergeleken worden aan de hand van een uitkragende ligger.

5.2 Vergelijking Bridges met de voorschriften

Bridges wordt vergeleken met de voorschriften aan de hand van een berekening van een uitkragende ligger. De handberekening vindt plaats met Excel en zal verder niet worden toegelicht. In het volgende hoofdstuk (H6) zal de handberekening met behulp van Excel wel worden toegelicht.

De berekening van de uitkragende ligger gebeurt met onderstaande gegevens en het figuur van de ligger.



Figuur 5.1 De uitkragende ligger

Liggegevens:

Eigen gewicht:	0 kg/m ³
Kwaliteit:	B 45 c.q. B85
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)
Discretisering:	5 elementen van 0,2 m.

In de grafieken die in deze paragraaf zijn weergegeven zijn alleen de eindresultaten van de hand- en Bridges berekening te zien. Deze eindresultaten zijn de verkortingen die optreden aan de uitkragende ligger tengevolge van de puntlast.

De grafieken zijn per betonklasse weergegeven. In elke grafiek worden een vijftal lijnen weergegeven, te weten:

- Een handberekening volgens:
 1. de Model Code 1978
 2. de Model Code 1990
 3. de VBC
- Een Bridges berekening, waarin in het materialen bestand de ontwikkeling van de sterkte en de E-modulus in de tijd en de basis krimp- en kruipcoëfficiënten zijn toegepast volgens:
 4. de Model Code 1978
 5. de Model Code 1990

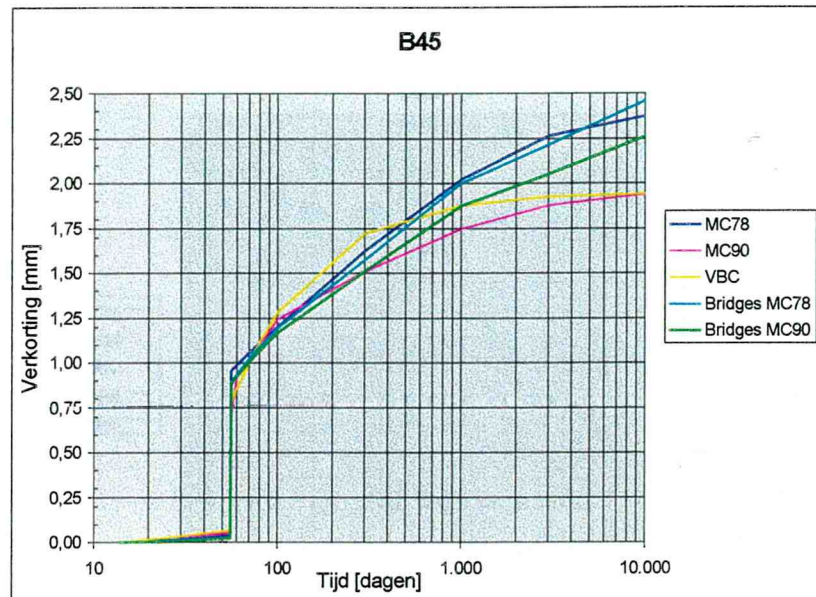
Hierin is de laatste de foutieve berekeningswijze die in de praktijk weleens wordt toegepast. Op voorhand kan al geconcludeerd worden dat door simpelweg de basiskrimp- en kruipfactoren van de Model Code 90 in de MC78 te stoppen, men niet kan verwachten correcte antwoorden te vinden.

De handberekening vindt plaats met in achtneming van de volgende gegevens voor het bepalen van de coëfficiënten. Deze zijn ook af te leiden van bovengenoemde gegevens:

- Fictieve dikte: 125 mm.
- Tijdstip van belasten: 56 dagen
- Tijdstip van ontkisten: 14 dagen
- Constante omgevingstemperatuur voor en na storten: 10,4°C

5.2.1 B45

De onderstaande grafiek laat de resultaten zien van de diverse berekeningen van de uitkragende ligger voor betonklasse B45.



Figuur 5.2

De verkorting die in de ligger optreedt in het tijdsinterval 14 tot 56 dagen is toe te schrijven aan de krimp. Aangezien er in dat interval geen belasting aanwezig is, speelt kruip geen rol. De sprong bij 56 dagen is de elastische vervorming ten gevolge van het aanbrengen van de belasting. Het verdere vervormingsverloop is toe te schrijven aan zowel krimp als kruip.

De licht en donker blauwe lijnen zijn beide MC78 berekeningen. De één volgens Bridges en de ander is de handberekening. Er is duidelijk te zien dat deze gelijk zijn, dit is een goede controle (voor de handberekening).

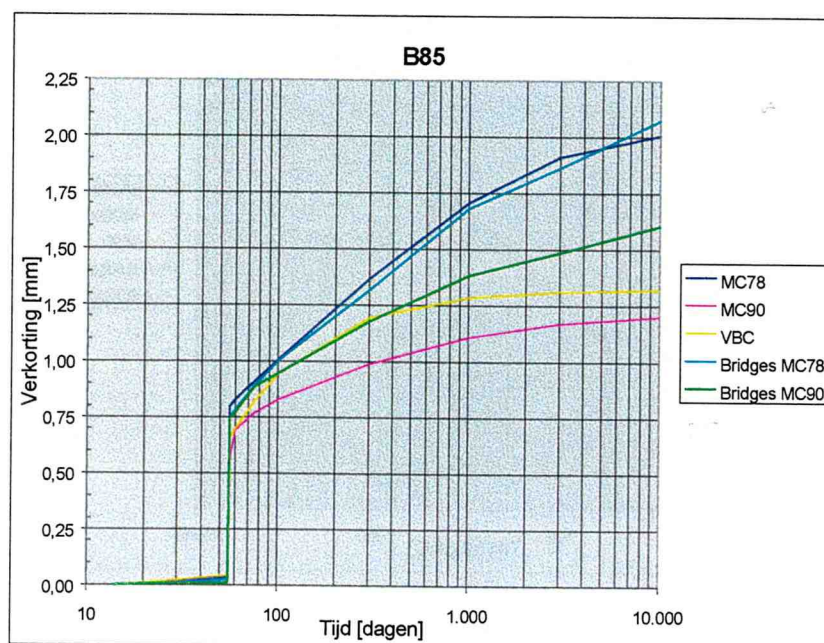
De groene lijn geeft de Bridges berekening weer met de ontwikkeling van de sterkte en de E-modulus in de tijd volgens de MC90, maar ook de onjuiste benadering met de basis krimp- en kruipcoëfficiënten volgens diezelfde Model Code 90. Deze zijn verwerkt in het materialen-bestand.

De lichtpaarse lijn geeft het vervormingsverloop volgens handberekening van de Model Code 1990 weer. Hierbij is daadwerkelijk volgens de norm berekend. Er valt duidelijk op dat deze sterk afwijkt van de groene vervormingslijn. Zoals in vorige hoofdstukken is gebleken, blijkt zowel de krimp als kruip van de Model Code 1990 minder te zijn dan die van de Model Code 1978, dit blijkt ook duidelijk uit bovenstaande figuur.

De (eind)vervormingen volgens VBC komt, net als bij het vergelijk van de krimp en kruip in het vorige hoofdstuk, grotendeels overeen met de vervormingen volgens de Model Code 1990.

5.2.2 B85

Voor B85 is de berekening ook uitgevoerd, voor de handberekening is wederom uitgegaan van Excel, en voor de Bridges berekening is het materialen-bestand aangepast voor deze betonkwaliteit. Het cementtype is voor B85 veranderd van 'normaalhardend cement' naar 'snelhardend hogesterkte cement'. Verder zijn ook de E-moduli, en de basiskrimp- en -kruipcoëfficiënten in het materialen-bestand aangepast.



Figuur 5.3

De handberekening en de Bridges berekening volgens de Model Code 1978 komen weer precies overeen. De kleine afwijkingen zijn te verklaren door de lineaire interpolatie van Bridges en afwijkende tijdstappen. Bridges rekent met tabellen en interpoleert lineair tussenliggende waarden, terwijl bij de handberekening wordt uitgegaan van formules. Deze formules zijn gemaakt door een andere afstudeerder die al eerder onderzoek naar dit onderwerp heeft gedaan. De formules zijn vermeld in het afstudeerwerk van Van Liebergen. Zie hiervoor ook Bijlage A van het afstudeerwerk dat voor u ligt, waar zowel de tabellen als de formules zijn weergegeven.

Wederom valt op dat de eindwaarden van de vervorming volgens de VBC en de Model Code 90 dicht bij elkaar liggen. Dit lijkt aan te geven dat deze voorschriften de realiteit beter benaderen. Het kan echter ook zo zijn dat de VBC is gebaseerd op uitgangspunten van de Model Code 1990.

Verder valt op, dat net als bij het vergelijk van de krimp en kruip uit het vorige hoofdstuk de Model Code 78 bij hogesterkte beton veel verder afwijkt van de twee andere voorschriften.

5.3 Bridges modelleren als de Model Code 1990

Zoals al duidelijk is geworden kan Bridges niet rekenen volgens de Model Code 1990. Echter is toch gewenst dat er gerekend kan worden volgens de MC 90. Hiertoe zullen een aantal aanpassingen aan het materialenbestand moeten plaatsvinden.

Als eerste moet men vanzelfsprekend de ontwikkeling van de sterkte en de E-modulus via de MC90 bepalen. De basiskrimp en -kruipcoëfficiënten zullen op een andere wijze bepaald moeten worden. In de vorige paragrafen is duidelijk geworden dat het gebruik van de basiscoëfficiënten volgens of de MC78 of de MC90 niet tot juiste resultaten leidt. Dit is ook logisch, want door het gebruik van basiskrimp en kruipcoëfficiënten uit de MC90 die vervolgens in het Bridges materialen-bestand ingevoerd worden (welke rekent volgens de MC78) krijgt men onjuiste resultaten. Ook het blijven toepassen van de MC78 basiskrimp- en kruipcoëfficiënten, terwijl de ontwikkeling van de sterkte en de E-modulus berekend wordt volgens de MC90 leidt tot onjuiste resultaten. Zoals al eerder te zien is geweest, zijn de formuleringen van de basiskrimp- en -kruipcoëfficiënten volgens de twee genoemde voorschriften duidelijk anders.

In deze paragraaf zullen basiskrimp- en kruipcoëfficiënten bepaald worden, zodat men beter via de Model Code 1990 kan gaan rekenen. Deze coëfficiënten worden in principe via een tune-methode / curve-fitting bepaald, zodat de krimp- en kruipkrommen in de tijd, van de MC78 en de MC90 zoveel mogelijk op elkaar komen te liggen. Deze methode is eigenlijk een truc, waarbij dus wordt gepoogd de kromme van de MC78 waarmee Bridges rekent, zoveel mogelijk overeen te laten komen met de kromme van de MC90. Dat dit niet precies zal lukken en afbreuk doet aan de opgestelde formuleringen is duidelijk, de twee model codes gaan immers geheel verschillend met de krimp- en kruipformuleringen om. Echter lijkt dit vooralsnog de enige manier om met Bridges te rekenen volgens de Model Code 1990.

5.3.1 Kruip-modellering

Als eerste zal de kruip-modellering plaatsvinden. Kruip is afhankelijk van diverse factoren. Volgens de voorschriften zijn deze factoren:

- de betonkwaliteit;
- de relatieve vochtigheid;
- het tijdstip van belasten;
- de fictieve dikte;
- en een (constante) omgevingstemperatuur.

Er zal hier geprobeerd worden een zo praktisch mogelijke modellering te maken, oftewel een modellering die zo goed mogelijk aansluit op in de praktijk toe te passen waarden. Indien alle factoren gevarieerd worden komen er zeer veel grafieken naar voren, waarbij men al snel het overzicht kwijt zal raken.

Er wordt daarom van de volgende waarden uitgegaan:

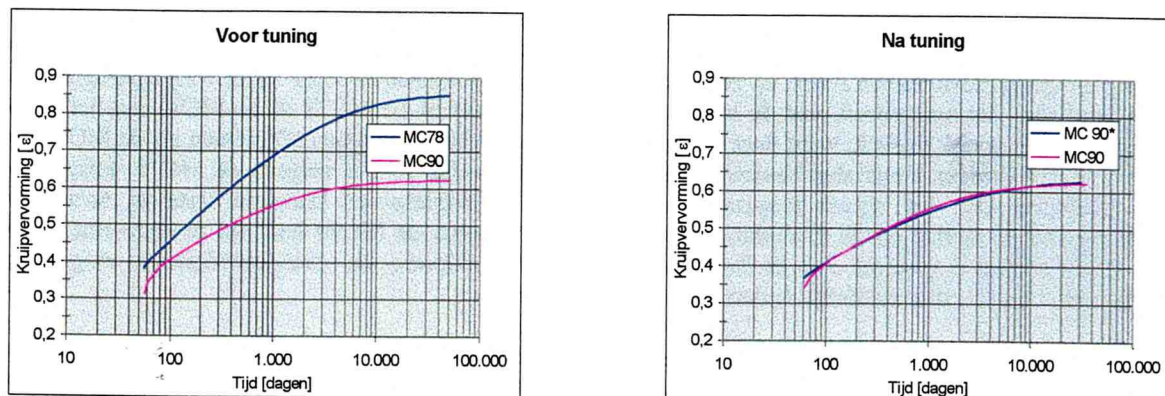
- Betonkwaliteit: B45 / B65 / B85
- Relatieve vochtigheid: 75 %
- Tijdstip van belasten: variabel
- Fictieve dikte: 400 mm.
- Omgevingstemperatuur: 10,4 °C constant

Indien ook gevarieerd zou worden met de relatieve vochtigheid, de fictieve dikte en de temperatuur, krijgt men een veelvoud van grafieken, waardoor duidelijk ver te zoeken zal zijn. Indien net als hier voor reële waarden wordt gekozen, is een dergelijke variatie niet nodig.

Met de hier boven genoemde waarden zal een tuning gemaakt worden en komen de aan te bevelen basis-kruipcoëfficiënten naar voren. Er is hier ook de betonkwaliteit B65 toegevoegd, vanwege het feit dat deze betonkwaliteit in de praktijk ook vaak gebruikt wordt. En in een later stadium van dit onderzoek zal blijken dat er een aantal praktijk- en laboratoriumonderzoeken zijn gedaan met B65 als uitgangspunt.

Om duidelijkheid te verschaffen over hoe de tuning / curve-fitting heeft plaatsgevonden, hier een korte toelichting. De toelichting geschied aan de hand van de modellering van de kruipkrommen (incl. de elastische vervormingen). Hieronder is de beschrijving van de B45 variant weergegeven, met een belastingtijdstip van 56 dagen.

De linkerfiguur geeft de kruipkrommen weer voor de tuning. Er is al eerder gerekend met de genoemde variabelen (B45, $t=56$ dagen, enz.), te weten in Hoofdstuk 4, zie dan ook figuur 4.1.

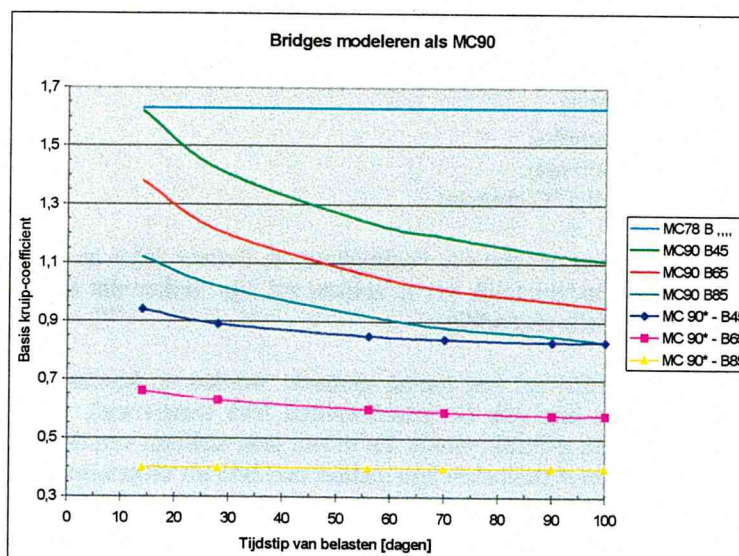


De rechter figuur geeft de curve-fitting aan. Hier is de blauwe lijn van de Model Code 1978 zo goed mogelijk op de lijn van de MC90 gelegd, door de basis-kruipfactor in de formulering van de Model Code 1978 aan te passen. Hiertoe zijn in de MC 78 (vanzelfsprekend) ook de elasticiteitsmodulus en de sterkte-ontwikkeling van de Model Code 1990 gebruikt. Het blijkt dat dit redelijk goed lukt.

De kruipfactor is veranderd van 1,63 (MC78) naar 0,85 (MC90*). Er is voor gekozen om de getunede Model Code 1990 weer te geven als MC90* om duidelijk te maken dat dit niet de exacte berekening volgens de MC 90 is maar de getunede.

De kruipfactor waarover wordt gesproken is de factor ϕ_{fi} uit de Model Code 1978. Het is bekend dat de berekeningen worden uitgevoerd met behulp van een spreadsheet. In het volgende hoofdstuk zal de werking van deze spreadsheet worden toegelicht. In figuur B.2. uit Bijlage B, de bijlage die wordt gebruikt voor hoofdstuk 6, is de formulering van de kruip in de Model Code 1978 terug te vinden. Hierin is ook de factor ϕ_{fi} (ff1) terug te vinden. Om de lijn van de MC 78 zo goed mogelijk te verschuiven zodat deze op de MC90 valt, is met een trail-and-error methode gepoogd het verloop van de figuur hier rechtsboven te bereiken door de factor ϕ_{fi} aan te passen. Door simpelweg een getal in te vullen en te kijken of de twee krommen al ongeveer gelijk zijn, is een waarde van 0,85 voor de factor ϕ_{fi} gevonden.

Deze curve-fitting / tuning is voor diverse tijdstippen van belasten uitgevoerd. De resultaten hiervan zijn in onderstaande grafiek terug te vinden.



Figuur 5.4

In figuur 5.4 is als eerste de basis kruipcoëfficiënt te zien volgens de Model Code 1978. Deze is voor alle betonklassen en elk willekeurig tijdstip van belasting constant (1,63 bij niet lineaire interpolatie).

Vervolgens zijn de basis kruipcoëfficiënten te zien volgens de Model Code 1990. Deze zijn wel afhankelijk van de betonklasse en van het tijdstip van belasting.

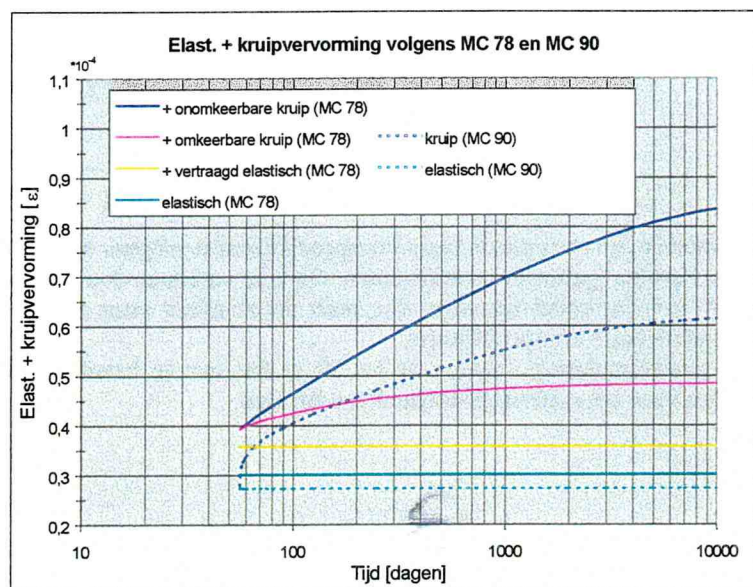
De onderste drie lijnen zijn de aan te bevelen (ofwel de getunede) basis-kruipcoëfficiënten bij de genoemde uitgangspunten (fictieve dikte, relatieve vochtigheid, enz). Indien een andere fictieve dikte of relatieve vochtigheid wordt gebruikt, zal de grafiek, en daarmee de aanpassing van de basis-kruipcoëfficiënten geheel anders worden. Als er dus een berekening uitgevoerd dient te worden met een fictieve dikte van 400 mm, 75% relatieve vochtigheid, een temperatuur van 10°C, betonkwaliteit B65 en een tijdstip van belasting van ongeveer 28 dagen, kan uit figuur 5.4 worden afgelezen dat voor de factor ϕ_{f1} een waarde aangehouden kan worden van ongeveer 0,63.

Door het aanpassen van de basiskruipcoëfficiënt van 1,63 naar 0,85 wordt dus niet de kruip aangepast van 1,63 x iets naar 0,85 x iets. De basiskruipcoëfficiënt in de Model Code 1978 is namelijk niet onderdeel van een produkt (vermenigvuldiging) zoals bij de VBC en de Model Code 1990, maar onderdeel van een sommatie. Voor verduidelijking zie de kruipformulering in paragraaf 5.1. De termen in de formulering representeren als volgt: de elastische vervorming, de vertraagd elastische vervorming, de omkeerbare kruip en de onomkeerbare kruip. De basiskruipcoëfficiënt is een factor in de onomkeerbare kruip. De factor ϕ_f die in de formulering vermeld staat, bestaat uit een produkt van ϕ_{f1} en ϕ_{f2} . Hierin is ϕ_{f1} de basiskruipcoëfficiënt.

Indien wederom de uitgangspunten worden toegepast die in tuning ook zijn gebruikt, is goed te zien welk aandeel elk van de onderdelen van de formulering heeft.

De donkerblauwe lijn is de totale kruipvervorming (dus elastische vervorming + vertraagd elastische vervorming + omkeerbare + onomkeerbare kruip). Deze is gelijk aan de lijn in de linkerfiguur op de vorige pagina. Duidelijk te zien is dat wanneer de basiskruipcoëfficiënt (ϕ_{f1}) op 0,00 wordt gezet, er wel kruipvervorming optreedt. Deze kruipvervorming zal dan nog bestaan uit vertraagd elastische vervorming en omkeerbare kruip. In de Model Code 1990 en de VBC zou naast de elastische vervorming geen kruipvervorming optreden wanneer de basiskruipcoëfficiënt nul is.

Verder dient opgemerkt te worden dat de tuning alleen geldt voor die situaties waarbij de belasting aangebracht wordt en niet wordt verwijderd en waarbij



Figuur 5.5

later niet nogmaals belasting wordt aangebracht en verwijderd. Vanwege het feit dat (zoals uit bovenstaand figuur blijkt) de kruipvervorming in die gevallen onjuist gemodelleerd wordt. De omkeerbare en de vertraagd elastische kruip zullen in de gevallen waarbij belasting erbij wordt geplaatst, er later weer af wordt gehaald, enz. niet goed beschreven worden. De in dit hoofdstuk beschreven modelering voor de kruipvervorming van de MC90* is dus gebaseerd op de totale kruipvervorming, waarbij belasting aanwezig is. Indien er belasting wordt verwijderd en eventueel later weer wordt aangebracht is deze modelering niet juist. Dus in principe mag deze modellering niet gebruikt worden tijdens de bouwphase van de brug.

5.3.2 Krimp-modellering

Na een succesvolle aanpassing van de basis-kruipcoëfficiënten is de basis-krimpcoëfficiënt aan de beurt, zoals eerder genoemd is ook de krimp afhankelijk van een aantal factoren. Deze zijn:

- Betonkwaliteit
- Relatieve vochtigheid
- Tijdstip van ontkisten
- Fictieve dikte
- (Constante) omgevingstemperatuur

Om ook hier zo realistisch mogelijke waarden te verkrijgen, wordt er van de volgende waarden uitgegaan:

- Betonkwaliteit: B45 / B65 / B85
- Relatieve vochtigheid: 75 %
- Tijdstip van ontkisten: 3 dagen
- Fictieve dikte: 400 mm.
- Omgevingstemperatuur: 10,4 °C constant

Aangezien er hier, naast de betonkwaliteit, geen variabele naar voren komt, kunnen de resultaten eenvoudig in een tabel opgesomd worden. Er zou gevarieerd kunnen worden met de fictieve dikte, maar vanwege het feit dat dit dan ook zou moeten bij de kruip, is hiervoor niet gekozen. De tuning is op dezelfde wijze als bij de kruip uitgevoerd. In figuur B.1 in Bijlage B (behorend bij Hoofdstuk 6) is de factor ε_{s1} (es1) terug te vinden. Met deze factor is wederom via een trail-and-error methode gepoogd de krimpcurven gelijk te krijgen. Hieronder zijn de waarden voor ε_{s1} terug te vinden.

MC 78 B ...	MC 90 B45	MC 90 B65	MC 90 B85	MC 90* B45	MC 90* B65	MC 90* B85
-2,73	-2,60	-1,90	-1,15	-2,57	-1,90	-1,14

*10⁻⁴

Tabel. 5.1

Wat meteen opvalt is dat de basis krimpcoëfficiënten volgens de Model Code 1990 zo goed als gelijk zijn aan de aan te bevelen (getuned) coëfficiënten. Dit is te verklaren door aan te nemen dat de krimpformulering (de totale krimp) in beide codes hetzelfde zijn, maar dat ze alleen maar een ander uiterlijk gekregen hebben met daardoor een andere basis krimpcoëfficiënt.

De krimpformulering volgens de MC90 is dus aan te bevelen indien men de basis krimpcoëfficiënten wil bepalen voor het materialen-bestand van Bridges.

5.3.3 Controle

Nu zijn wel de krimp- en kruipcurven gefit, het gaat er echter om dat de totale vervormingen die berekend worden met de Model Code 90 en de getuned MC90 overeenstemmen. Daartoe zullen er een tweetal controles plaatsvinden.

De eerste is een Bridges-berekening toetsen aan een eenvoudige handberekening met waarden die ook voor de modellering zijn gebruikt. De tweede controle zal een berekening zijn met de uitkragende ligger die al eerder in dit hoofdstuk is gebruikt.

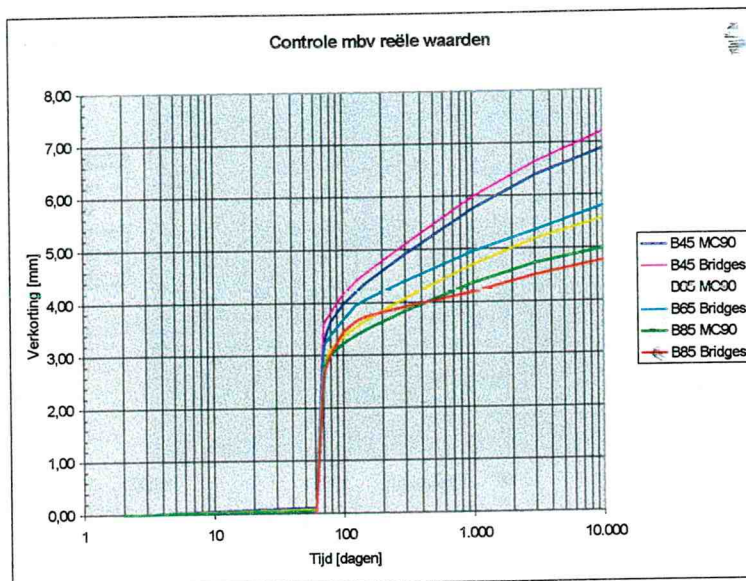
Controle m.b.v. reële waarden

Deze controle vindt plaats met de waarden die ook gebruikt zijn om de curve-fitting te maken. Dit zijn de meest reële waarden voor de parameters. Deze parameters komen goed overeen met de daadwerkelijke uitbouwbrug. Bij deze controle dient een keuze gemaakt te worden ten aanzien van het belastingtijdstip, gekozen wordt voor 56 dagen na storten. De waarde hiervan zal in de praktijk hier ongeveer aan gelijk zijn of wat hoger ligger. Let wel, het gaat hier nog steeds om het gemiddelde tijdstip van belasten. In principe wordt de constructie in de praktijk 3 dagen na storten al belast en elke week zal de belasting hoger worden. In Figuur 5.4 is duidelijk geworden dat boven een belastingtijdstip van 56 dagen de basis-kruipcoëfficiënt nog maar weinig veranderd. Vandaar dat voor deze coëfficiënt gekozen is.

In de onderstaande figuur is de vervorming te zien van een uitkragende ligger met:

- lengte: 5m
- afmetingen: fictieve dikte 400 mm (800 bij 800 mm)
- onkisten: 3 dagen na storten
- belasten: 56 dagen na storten
- belasting: 20 N/mm²

Er is wederom gekozen voor een uitkragende ligger. De handberekening en een Bridges berekening hiervan is namelijk relatief eenvoudig.



Figuur 5.6

De grafieklijnen met MC90 als bijschrift, stelt de handberekening volgens de formuleringen van de Model Code 1990 voor. Als eerste is volgens dit voorschrift de krimprek bepaald en vervolgens de kruipfunctie (J). Deze is op zijn beurt weer vermenigvuldigd met de belasting. Deze twee rekken leiden tot de vervormingen over 5 meter, welke zijn weergegeven in bovenstaande figuur.

De grafieklijnen met bijschrift Bridges geven de Bridges-berekeningen weer volgens de getunedede Model Code 90 (MC 90*). Er is te zien dat beide berekeningen goed overeen komen. Duidelijk mag zijn dat het onmogelijk is om te bereiken dat de twee lijnen precies gelijk zijn. Bridges blijft rekenen volgens de formuleringen van de Model Code 1978, maar met aangepaste basiscoëfficiënten. Het feit dat Bridges lineair interpoleert tussen de waarden uit het materialen-bestand, terwijl de handberekening exact rekent, levert ook een fout op.

Echter het verschil tussen de waarden zoals gegeven in bovenstaande figuur is maximaal (bij $t = 10.000$ dagen) 4,5 % ten opzichte van de waarden volgens de handberekening. Een dergelijk foutmarge is zeker bij een dergelijk tuning acceptabel.

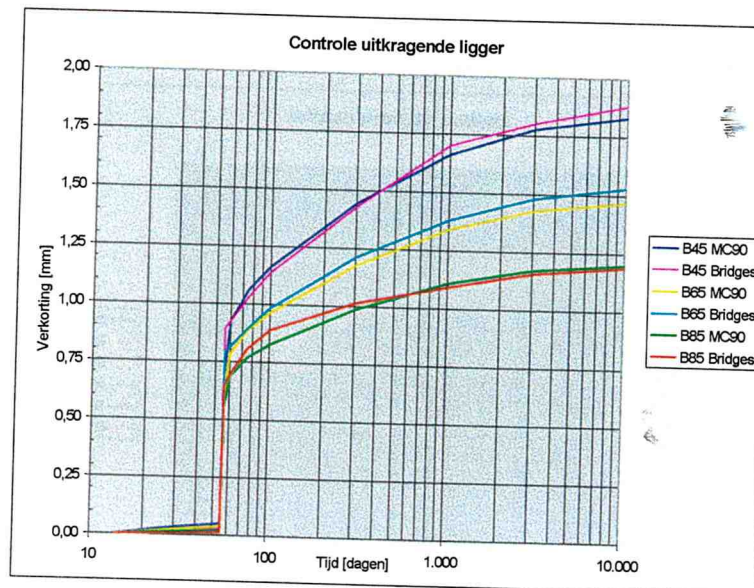
Controle a.d.v. de uitkragende ligger

Vervolgens zal nog een dergelijke controle plaatsvinden aan de hand van de eerder gebruikte uitkragende ligger. Aangezien de uitkragende ligger uit paragraaf 5.1 een afmeting heeft van 0,25 x 0,25 m. en de bijbehorende fictieve dikte 125 mm. is, moeten de waarden voor de basiskrimp- en kruipcoëfficiënt opnieuw bepaald worden voor deze fictieve dikte. De tuning die in Figuur 5.4 gemaakt is, was voor een fictieve dikte van 400 mm.

De tuning gebeurt op een identieke wijze, zodat deze controle met een fictieve dikte van 125 mm representatief blijft. De getunedede waarden zullen hier niet worden weergegeven, en zullen alleen voor de berekening toegepast worden.

Hieronder de vervorming uit de controle berekening van de uitkragende ligger met de volgende uitgangspunten (zie ook eerder dit hoofdstuk):

- lengte: 1m
- afmetingen: fictieve dikte 125 mm (250 bij 250 mm)
- ontkisten: 14 dagen na storten
- belasten: 56 dagen na storten
- belasting: 24 N/mm²



Figuur 5.7

De grafieklijnen met MC90 zijn wederom de vervormingslijnen aan de hand van de handberekening volgens de Model Code 1990. De lijnen met Bridges zijn de vervormingen volgens Bridges aan de hand van de voor deze situatie opnieuw getuneerde waarden.

De maximaal optredende fout bij 10.000 dagen ten opzichte van de handberekening is hier slechts 4 %.

5.4 Conclusies

Er mag geconcludeerd worden dat toepassen van de Model Code 1990 binnen Bridges redelijk goed lukt. De hiervoor beschreven controleberekeningen tonen aan dat de verschillen tussen een handberekening en een berekening volgens Bridges met de MC90* weinig afwijken. In het vervolg van dit afstudeeronderzoek zal daar waar dit nodig is dan ook gebruikt gemaakt worden van de hier weergegeven tuning. Er dient nogmaals opgemerkt te worden, dat de hier gebruikte tuning alleen correct is voor de beschreven omstandigheden, dus een fictieve dikte van 400mm, een temperatuur en relatieve vochtigheid van respectievelijk 10°C en 75%. Maar belangrijker nog een constante en permanente belasting. De hier toegepaste tuning voor de MC90* zal onder andere worden toegepast in Hoofdstuk 8 en 9, waar diverse bruggen worden herberekend. Gekeken zal worden of met het toepassen van de MC90* betere resultaten bereikt kunnen worden wat betreft het vervormingsgedrag in relatie met de in de praktijk gemeten vervormingen.

In dit hoofdstuk is regelmatig de handberekening naar voren gekomen. Deze is hier niet verder toegelicht, maar dat zal in het volgende hoofdstuk gebeuren. Deze handberekening is in dit hoofdstuk van belang geweest met betrekking op het controleren van de Bridges berekeningen en inzicht krijgen in het formuleren van de tijdsafhankelijke vervormingen binnen de diverse voorschriften.

6 De berekeningen nader toegelicht

In dit hoofdstuk zullen de berekeningen die in het vorige hoofdstuk zijn uitgevoerd nader worden toegelicht. Voor de lezer is waarschijnlijk niet op alle punten duidelijk hoe nu de (hand)berekening met Excel is uitgevoerd. Dit zal in dit hoofdstuk worden besproken. Vanwege het feit dat dit veel ruimte en toelichting in beslag neemt en in eerste instantie niet essentieel is voor het verhaal in dit afstudeeronderzoek, is de toelichting geplaatst in de Bijlage B.

In de vorige hoofdstukken zijn er handberekeningen gemaakt volgens de diverse voorschriften. Deze handberekeningen zijn met behulp van Excel uitgevoerd. Vanwege het feit dat er veel berekeningen moesten worden uitgevoerd, allen met een repeterend karakter, is er voor gekozen de voorschriften in een spreadsheet te modelleren.

In Excel zijn alle formules van alle drie de voorschriften getypt. Er is een invoer-gedeelte in de werkbladen gemaakt, waardoor eenvoudig met de diverse parameters gevarieerd kan worden. Doordat het nu zo eenvoudig geworden is om de invoerparameters (temperatuur, relatieve vochtigheid, fictieve dikte, enz.) te variëren kan gemakkelijk een groot aantal exercities worden uitgevoerd.

Voor een duidelijker beeld van het Excel werkblad wordt verwezen naar Bijlage B. Hier is voor elke waarde in het werkblad beschreven welke formule heeft geleid tot de weergegeven waarde. Zo kan ter controle de invoer eenvoudig nagerekend worden. Om dit nog verder te vergemakkelijken en te verduidelijken is ook een handberekening volledig uitgeschreven.

7 Resultaten onderzoeken

7.1 Inleiding

In de vorige hoofdstukken is onderzocht hoe de diverse voorschriften de tijdsafhankelijke vervormingen beschrijven. Er is een andere manier gezocht om de Model Code 1990 te gebruiken binnen Bridges. De diverse voorschriften zijn onderling vergeleken. In dit hoofdstuk zullen de voorschriften vergeleken worden met praktijk- en laboratoriumonderzoeken. Er zijn namelijk een aantal onderzoeken die interessant zijn om in dit afstudeeronderzoek mee te nemen.

De onderzoeken die in dit hoofdstuk meegenomen worden zijn:

- Het monitoringsonderzoek aan de 2^e Stichtse Brug. Er is een uitgebreid monitoring rapport [14] opgesteld naar aanleiding van de bouw van deze brug. De eerste hogesterkte beton brug in Nederland.
- Het monitoringsonderzoek aan de Dintelhavenbrug. Ook deze brug wordt gemonitord, echter veel minder uitgebreid dan de 2^e Stichtse Brug [14].
- Het monitoringsonderzoek aan de brug bij Vianen. Hiervoor geldt hetzelfde als bij de Dintelhavenbrug [14].
- Een tweetal onderzoeken naar B65 verricht aan de TU Delft [15 en 16].

In dit hoofdstuk zal dus onderzocht worden in hoeverre de voorschriften overeenkomen met de praktijk- en laboratoriumonderzoeken. Aan de hand hiervan zullen indien nodig aanpassingen aan de voorschriften worden gedaan, en deze aanpassingen meegenomen worden bij het herberekenen van de diverse uitbouwbruggen in een later hoofdstuk.

7.2 monitoring 2^e Stichtse Brug

Aangezien de 2^e Stichtse Brug de eerste hogesterkte betonnen uitbouwbrug in Nederland is, heeft de Bouwdienst Rijkswaterstaat in overleg met de TU Delft ertoe besloten deze brug uitgebreid te monitoren. Deze monitoring zal in dit hoofdstuk en in het volgende hoofdstuk (wat specifiek over de 2^e Stichtse Brug zal gaan) uitgebreid worden besproken. De facetten die momenteel worden of zijn gemonitord en ook in dit afstudeerrapport worden behandeld zijn de volgende:

- Er worden krimpmetingen verricht. Deze vinden zowel plaats in het laboratorium als aan een tweetal proefstukken die in de brug zijn geplaatst. Deze proefstukken zijn geplaatst in de moten 13 en 15 van de laatst gebouwde kraagarm. Deze proefstukken zijn van dezelfde stort als de moten zelf en hebben een dikte die overeenkomt met de dikte van het middenlijf ter plaatse van de twee genoemde moten.
- Er worden kruipmetingen verricht in het laboratorium.
- De elasticiteitsmodulus is voor verschillende ouderdommen onderzocht.
- Zo ook de kubusdruksterkte.
- Er worden vervormingen aan de brug gemeten. Vervormingen zijn gemeten op de wand van moot 2, 13 en 15 van de laatst gebouwde kraagarm van de brug. Dit is in eerste instantie gedaan door wapeningsstaven uit te rusten met rekstrookjes en in een later stadium zijn zogenaamde meetpuntjes op de genoemde moten aangebracht.
- Er zijn deformatiemetingen verricht. Dit zijn de inmiddels bekende metingen, die ook in de *Voorstudie* terug te vinden zijn.
- Vanaf de start van de bouw van de brug zijn de temperatuur en de relatieve vochtigheid gemeten.

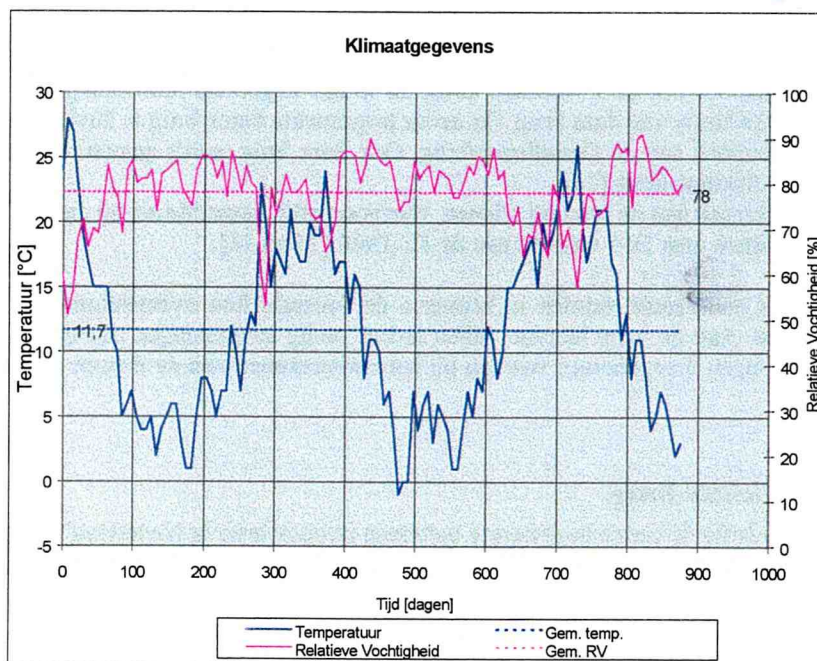
Alle bovenstaande punten behalve de vervormingen en deformatiemetingen zullen in dit hoofdstuk worden behandeld. De andere twee punten zullen in het volgende hoofdstuk aan de orde komen.

Als eerste zullen de metingen ten aanzien van de temperatuur en relatieve vochtigheid hier besproken worden. Aan de hand van deze metingen zullen bepaalde verschijnselen bij de krimpmetingen waarschijnlijk makkelijker verklaard kunnen worden. Krimp is namelijk afhankelijk van omgevingsomstandigheden als temperatuur en relatieve vochtigheid. De andere facetten zoals kruip zijn dit ook, maar deze metingen hebben plaatsgevonden onder geconditioneerde omstandigheden (het laboratorium).

Voor verdere details, meetgegevens, figuren enzovoort wordt men verwezen naar het monitoring-rapport [14].

7.2.1 Temperatuur en relatieve vochtigheid

Als eerste zullen de metingen van temperatuur en relatieve vochtigheid behandeld worden. Vanaf het gereedkomen van de brug zijn de twee constant gemeten. Van augustus 1997 tot 1 januari 2000 zijn hieronder de gegevens in een grafiek verwerkt. In de grafiek zijn de gemiddelde weekgegevens weergegeven van de metingen in de koker. Dag- (en nacht)cycli zijn buiten beschouwing gelaten, hierdoor zou de grafiek niet duidelijker worden. De temperaturen en relatieve vochtigheden zijn zowel binnen als buiten de koker gemeten. In de onderstaande figuur zijn de gemiddelden weergegeven. De gemiddelde jaartemperatuur binnen de koker is ongeveer 1,5°C lager dan buiten de koker. De gemiddelde relatieve vochtigheid is in de koker ongeveer 4% lager dan buiten.



Figuur 7.1 Klimaatgegevens 2^e Stichtse Brug

De paarse lijn geeft met de rechter-as de relatieve vochtigheid aan en de blauwe lijn met de linker-as de temperatuur. De gestippelde horizontale lijnen zijn de gemiddelde waarden over het interval. Dit is dus niet gemiddelde jaartemperatuur of relatieve vochtigheid, aangezien het interval ongeveer 2½ jaar omvat. De gemiddelde jaartemperatuur is gemiddeld over 1998 en 1999, in de koker gemeten: 11,6°C en relatieve vochtigheid is: 78,8%.

In vergelijking met de aangehouden waarden eerder in dit afstudeeronderzoek komt dit redelijk goed overeen. Er is namelijk een temperatuur van 10,4°C en een relatieve vochtigheid van 75% aangehouden. Deze waarden zijn onderzocht (door derden) aan de hand van gegevens die over een langere tijd dan de hier genoemde 2 jaar lopen.

Indien er bij berekening voor wordt gekozen om een amplitude mee te nemen aangaande de temperatuur en relatieve vochtigheid wordt voor beiden vaak gekozen voor een amplitude van respectievelijk 10°C en 10 % RV. Deze amplitude simuleert in de berekening dan de jaargetijden.

Uit de bovenstaande figuur blijkt dan dat een dergelijke amplitude voor de temperatuur goed overeenkomt, echter een dergelijke amplitude is voor de relatieve vochtigheid minder goed terug te vinden.

7.2.2 Kubusdruksterkte

Bij de monitoring van de 2^e Stichtse Brug is vanzelfsprekend ook gemeten met betrekking tot kubusdruksterkten. Er zijn voor verschillende ouderdommen kubussen beproefd, de resultaten hiervan staan in onderstaande tabel. In de tabel worden verder nog de ontwikkeling van de kubusdruksterkte gegeven volgens de voorschriften. Bij de bepaling van de druksterkte van diverse kubussen wordt een gemiddelde 28 daagse druksterkte gevonden van 105,8 MPa. Dit zou volgens de VBC gelijk staan aan een B98, in plaats van B85, wat het uitgangspunt was bij de ontwerp-berekening.

In de onderstaande tabel wordt de ontwikkeling van de druksterkte weergegeven, dit wordt gedaan voor de laboratorium metingen en de twee verschillende Model Code's.

Ouderdom [dagen]	Lab. meting	MC 78	MC 90	MC 78 B45	MC 90 B45
7	90,17	60,8	65,7	30,4	34,4
14	99,40	74,3	82,0	37,1	39,8
28	105,80	84,8	96,0	42,4	44,2
56	108,09	93,3	107,3	46,5	47,5
90	115,23	97,7	113,6	48,8	49,3
364	120,79	107,5	126,3	53,8	52,9
587	123,88	109,9	129,2	55,0	53,7

De Model Code's hebben slechts een toepassingsgebied tot een cylinderdruksterkte van 80 MPa (B90), echter zijn deze hier toch toegepast om een vergelijk te hebben. Er is simpelweg als uitgangspunt niet een cylinderdruksterkte van 80 MPa in de formules ingevoerd, maar een van 88 MPa.

De Model Code 1990 beschrijft de ontwikkeling van de sterkte redelijk (vanaf 28 dagen). Echter tot 28 dagen geeft de MC90 een veel te lage sterkte. De Model Code 1978 blijft op elk punt veel te laag. Dit kan toegeschreven worden aan het feit dat dit voorschrift opgesteld is in een tijd waar nog geen hogesterkte beton bestond. Immers kijkend naar B45 komt de Model Code 1978 goed met de Model Code 1990 mee. Hier wordt dan ook er van uitgegaan dat de Model Code 1978 niet ontworpen is voor hogesterkte beton, alhoewel het voorschrift zelf vernoemd dat het tot B90 toepasbaar is.

7.2.3 Elasticiteitsmodulus

Zoals al gezegd is ook de elasticiteitsmodulus onderzocht. Te weten bij ouderdommen van 14, 28 en 365 dagen. Hiervoor zijn per ouderdom prisma's van 100mm bij 100mm bij 400mm beproefd. De gemiddelde waarden hiervan en de waarden volgens de diverse voorschriften staan in de onderstaande tabel weergegeven.

	Lab.	MC 78	MC 90
E ₁₄ [MPa]	37.350	39.932	38.012
E ₂₈ [MPa]	41.550	41.737	41.125
E ₃₆₅ [MPa]	46.725	45.176	47.177

De E-moduli volgens de twee voorschriften zijn bepaald op basis van een betonklasse B98 dat valt, zoals bekend is, buiten het eigenlijke toepassingsgebied van de voorschriften. Het is hier toch toegepast om een vergelijk te krijgen. De elasticiteitsmodulus wordt in de voorschriften bepaald aan de hand van de druksterkte. Een formule berekent op basis van de druksterkte de elasticiteitsmodulus. Wat nu dan opvalt is dat de Model Code 1978 goede waarden geeft terwijl de druksterkte-ontwikkeling achterblijft.

De afwijking bij 14 dagen is het grootst (7%) bij de Model Code 1978. Bij de elasticiteitsmodulus na 1 jaar is de grootste afwijking slechts 3% voor de Model Code 1978 (de MC90 zit hieronder). Kijkend naar de ontwikkeling van de elasticiteitsmodulus kan geconcludeerd worden dat beide voorschriften goede voorspellingen geven.

7.2.4 Krimpmetingen

Er zijn zoals gezegd ook krimpmetingen uitgevoerd aan proefstukken in het laboratorium en in de brugkoker zelf. Het proefstuk in het laboratorium bestaat uit een prisma van 400 x 100 x 100 mm. De lengte waarover de krimpvervorming wordt gemeten is 200 mm. Het proefstuk wordt in het laboratorium bewaard bij 20°C en een relatieve vochtigheid van 50%.

Op de 2^e Stichtse brug zijn tegelijkertijd met twee moten nabij het midden van de overspanning, blokken HSB gestort met afmetingen van 320 x 600 x 1000 mm. Het betreft de moten 13 en 15 van de laatst gebouwde kraagarm. Deze blokken worden ook wel dummy's genoemd. De dikte van het blok komt overeen met de dikte van het middenlijf. Op drie verschillende plekken op het blok wordt over een lengte van 800 mm gemeten.

Opgemerkt dient te worden dat de metingen beïnvloed zijn doordat de proefstukken tijdens de bouwperiode regelmatig nat geregend is. De dummy's zijn namelijk onder een gat in het dek geplaatst.

Als de gemeten vervormingen bij de blokken worden gecorrigeerd voor de temperatuurvervormingen blijven de krimpvervormingen over. Van kruip is in principe geen sprake, omdat er geen belastingen aanwezig zijn. Er wordt geen rekening gehouden met interne spanningen. Dit kunnen bijvoorbeeld spanningen zijn die ontstaan door onevenwichtig krimpen van het proefstuk. De buitenzijde van het proefstuk zal namelijk sneller krimpen dan het binnenste deel. Dit doordat de buitenkant meer blootstaat aan temperatuur en de buitenkant vocht met de omgeving uitwisselt. Hierdoor kunnen inwendige spanningen optreden welke wel tot kruip leiden.

Aangezien dat B98 buiten het toepassingsgebied van de Model Code's komt wordt met de maximaal toegestane betonkwaliteit B90 gerekend. Een hogere betonkwaliteit zou in de formuleringen leiden tot irreële waarde, zie bijvoorbeeld formule A.2.23, waarbij de formulering van teken zou omslaan.

Laboratoriumonderzoek.

Als eerste zullen de resultaten van het laboratoriumonderzoek besproken worden. De prisma's zijn gestort op de bouwplaats en bewaard in een container op het werk. Ze zijn na 3 dagen ontkist en bewaard in de container. De temperatuur en de relatieve luchtvochtigheid op het werk zijn terug te vinden in Figuur 7.1.

Er zijn voor de krimp prisma's gemeten bij 14 dagen ouderdom. De proefstukken die na 14 dagen beproefd zijn, zijn na 4 dagen uit de container gehaald en opgeslagen in het laboratorium.

Er zijn ook prisma's na 365 dagen beproefd, deze zijn na 362 dagen in het laboratorium opgeslagen bij 50% relatieve vochtigheid.

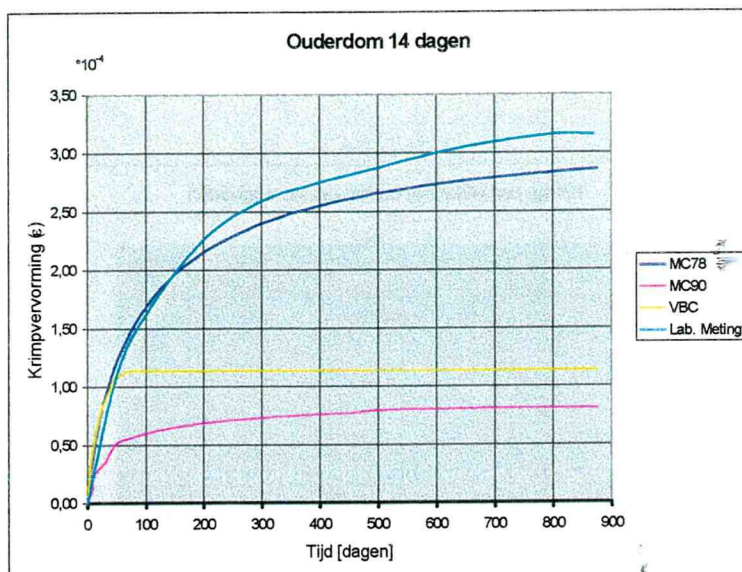
Er zal hieronder een vergelijk worden gemaakt van de krimpmetingen met de diverse normen. Vanwege het feit dat het beton in de periode voor het meten in het laboratorium blootgesteld heeft gestaan aan een afwijkende relatieve vochtigheid en temperatuur, zal gepoogd worden dit in de krimpberekeningen te verdisconteren. Er wordt gesproken van 'gepoogd' vanwege het feit dat de voorschriften niet ontworpen zijn om vervormingsprocessen van beton te beschrijven die gedurende hun levensloop in totaal verschillende omgevingsomstandigheden terecht komen.

Ouderdom 14 dagen

De prisma's die na 14 dagen ouderdom beproefd zijn hebben de volgende levensloop:

- Dag 0: Gestort.
- Dag 3: Ontkist.
- Dag 4: Bewaard in een container op het werk. De omstandigheden op het werk zijn volgens Figuur 7.1 in de eerste week als volgt:
 - gemiddelde weektemperatuur van 24 °C.
 - gemiddelde relatieve vochtigheid van 60 %.
- Dag 5 t/m 13: Bewaard in het laboratorium onder gecontroleerde omstandigheden met een:
 - temperatuur van 20 °C.
 - relatieve vochtigheid van 50%.
- Dag 14 t/m 884: Beproefd in het laboratorium onder dezelfde gecontroleerde omstandigheden.

Deze beproeving is weergegeven in onderstaande figuur. Hierbij is dag 14 als tijdstip 0 weergegeven, in verband met het feit dat de laboratorium meting vanaf 14 dagen ouderdom begonnen is.



Figuur 7.2 Laboratorium onderzoek – krimp – 2^e Stichtse Brug

Bij de berekening van de krimpvervorming volgens de voorschriften is rekening gehouden met de verschillende omstandigheden. Hoe dit is gedaan, is terug te vinden bij de berekening van de prisma's van 365 dagen ouderdom. Hierbij valt beter (grafisch) toe te lichten hoe het een en ander is berekend. Mede omdat bij de prisma's van 14 dagen ouderdom het aandeel 14 dagen niet duidelijk is terug te vinden in een grafiek met een tijdsbestek tot ruim 850 dagen.

Ouderdom 365 dagen

De prisma's beproefd na 365 dagen hebben de volgende levensloop:

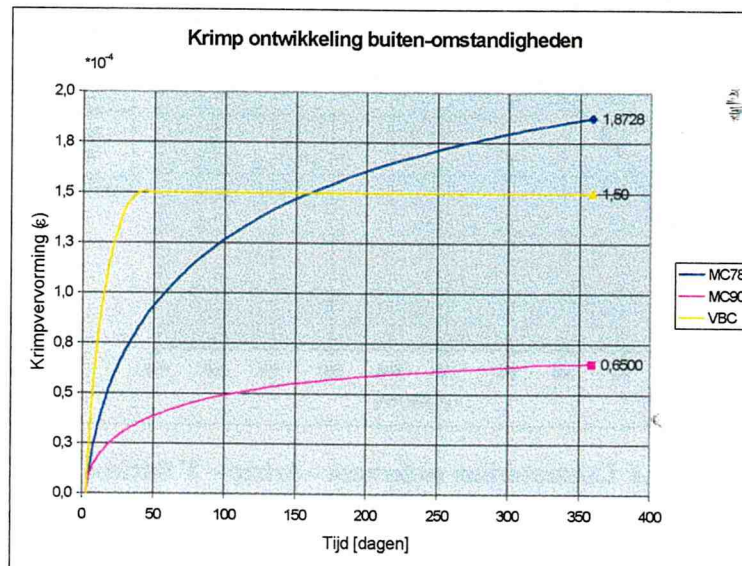
- Dag 0: Gestort.
- Dag 3: Ontkist.
- Dag 3 t/m 361: Bewaard in een container op het werk. De omstandigheden op het werk zijn volgens Figuur 7.1 gedurende het eerste jaar als volgt:
 - gemiddelde temperatuur van 11,9 °C.
 - gemiddelde relatieve vochtigheid van 76,6 %.
- Dag 362 t/m 364 Bewaard in het laboratorium onder gecontroleerde omstandigheden met een:
 - temperatuur van 20 °C.
 - relatieve vochtigheid van 50%.
- Dag 365 t/m 500 Beproefd in het laboratorium onder dezelfde gecontroleerde omstandigheden.

De berekeningswijze voor de voorschriften is als volgt en geldt zoals gezegd ook voor de prisma's met een ouderdom van 14 dagen, echter met afwijkende tijdstippen.

Gerekend is volgens de hierna genoemde wijze, vanwege het feit dat de prisma's onder verschillende omstandigheden bewaard zijn. De krimp zal namelijk anders zijn op het werk dan in het lab, vanwege het feit dat krimp afhankelijk is van temperatuur en relatieve vochtigheid. Deze wijze van berekening is niet conform enig voorschrift, omdat in de voorschriften niet wordt gesproken over dergelijke grote afwijkingen van omgevingsparameters.

De berekeningswijze is als volgt:

- Als eerste wordt de krimpvervorming bepaald volgens de voorschriften vanaf dag 3 t/m dag 361. Dit is namelijk de tijdsperiode dat de prisma's op het werk bewaard zijn. De krimpvervorming is in de onderstaande figuur weergegeven. In deze figuur zijn ook de waarden van de krimpvervorming weergegeven die volgens de voorschriften optreden op dag 361.



Figuur 7.3

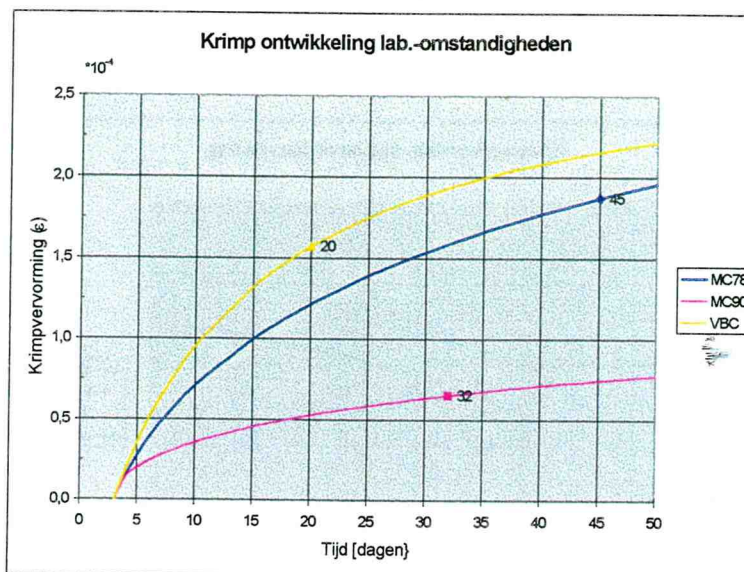
De krimpontwikkeling bij de VBC vlakt al snel af. Dit komt door het maximum dat wordt gesteld aan de krimpvervorming. Bij de omstandigheden hier, n.l. kleine fictieve dikte, en geen wapening komt men al snel aan het gestelde maximum.

- Vervolgens wordt de krimpvervorming nogmaals berekend, maar nu met de temperaturen en relatieve vochtigheid die geldt volgens de laboratorium omstandigheden. Deze krimpvervorming in de loop van de tijd is in figuur 7.4 weergegeven. In deze figuur is de krimp berekend alsof er niets aan de hand is en er gewoon een krimpvervorming optreedt bij 50% relatieve vochtigheid en 20°C.

In deze figuur zijn de waardes van de krimpvervorming opgezocht, zoals deze bepaald zijn in de vorige figuur na 361 dagen.

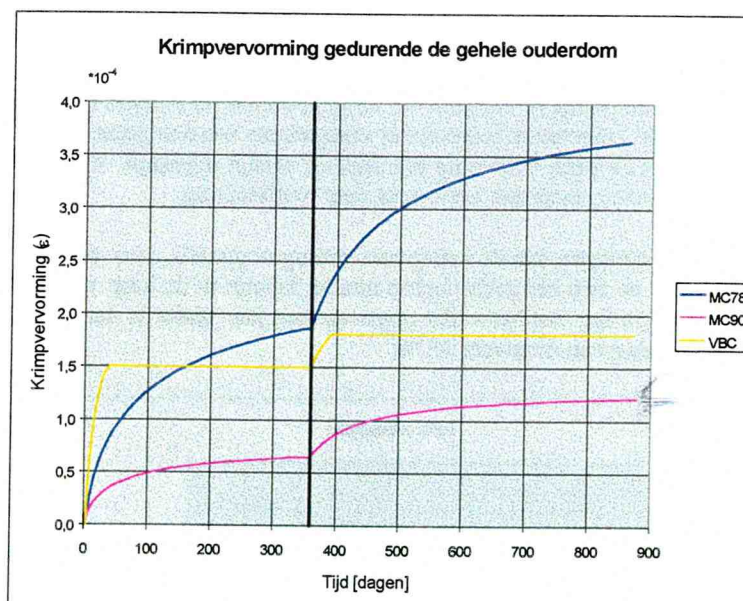
Deze waarden die men ook wel de fictieve ouderdom kan noemen zijn eronder weergegeven.

Wat opvalt is dat dezelfde krimpvervorming die na een jaar optreedt bij 11,9°C en 76,6 % RV, onder lab. omstandigheden (20°C en 50% RV) al na een maand á 1,5 maand optreden. Dit is te verklaren doordat beton bij een lagere relatieve vochtigheid en een hogere temperatuur sneller krimpt.



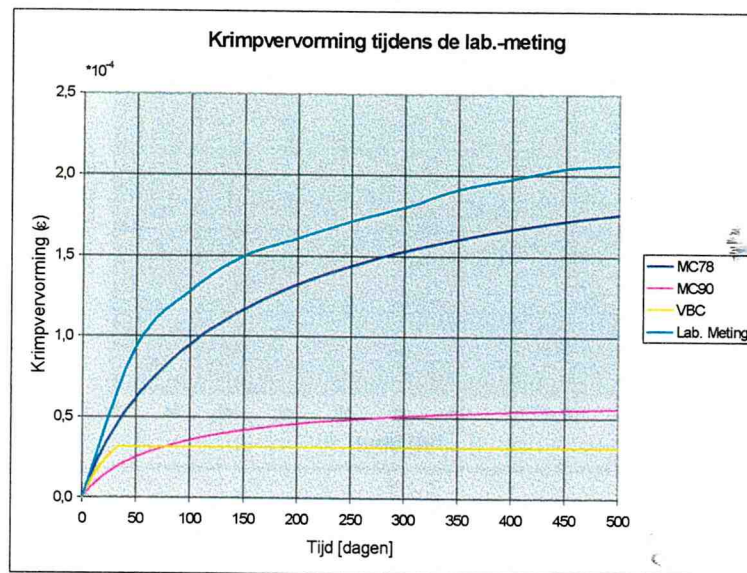
Figuur 7.4

- In onderstaande figuur is de krimpvervorming weergegeven vanaf de dag van storten. De wijziging in omgevingsomstandigheden is duidelijk te zien. Het linkerdeel van de figuur geeft dan de krimpvervorming weer bij buitenomstandigheden, en na een jaar veranderen deze naar lab. omstandigheden. In de figuur zijn Figuur 7.3 en het verloop van Figuur 7.4 (na de gemarkeerde punten) gecombineerd.



Figuur 7.5

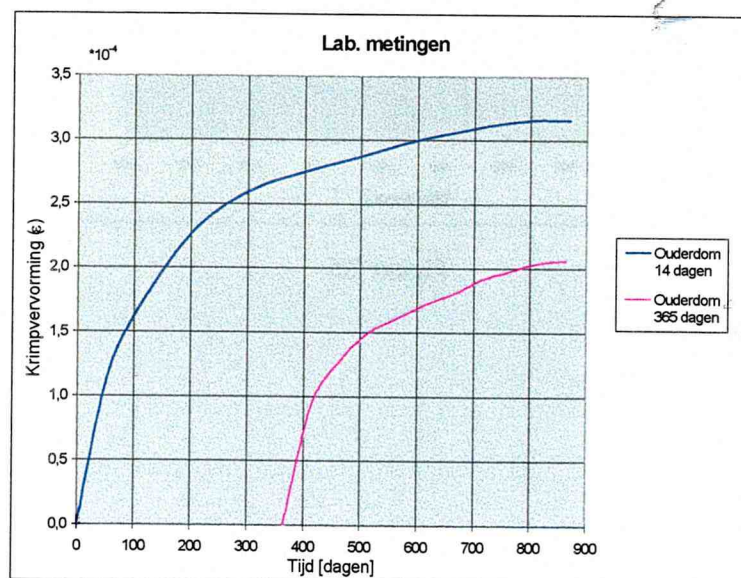
- In de onderstaande figuur is een vergelijk gemaakt tussen de berekende krimpvervorming en de daadwerkelijk gemeten krimpvervorming weergegeven. De berekende waarden volgens de voorschriften zijn gelijk aan het rechterdeel van Figuur 7.5.



Figuur 7.6

In eerste instantie lijkt de Model Code 1978 het beste te presteren, deze komt goed overeen met de krimpvervorming gemeten in het laboratorium. De vraag blijft echter of een berekening op dergelijke manier als hier is weergegeven juist is. De manier waarop de berekening is uitgevoerd lijkt de meest correcte manier om het te berekenen, er kunnen echter door de rekenwijze geen harde conclusies uit de figuren 7.6 en 7.2 getrokken worden. Hiervoor zijn de berekeningswijze en de voorschriften te ondoorzichtig. De berekening die hier is uitgevoerd bij een verandering van relatieve vochtigheid en temperatuur is immers niet conform een voorschrift. Bij de berekening volgens de VBC moeten in ieder geval vraagtekens worden gezet. De krimpvervorming wordt bij een fictieve dikte van 50 mm en geen wapening erg snel en abrupt afgeknapt. Vergelijkend met de MC90 is grootte van de krimp overeenkomstig, maar het verloop is zeer twijfelachtig.

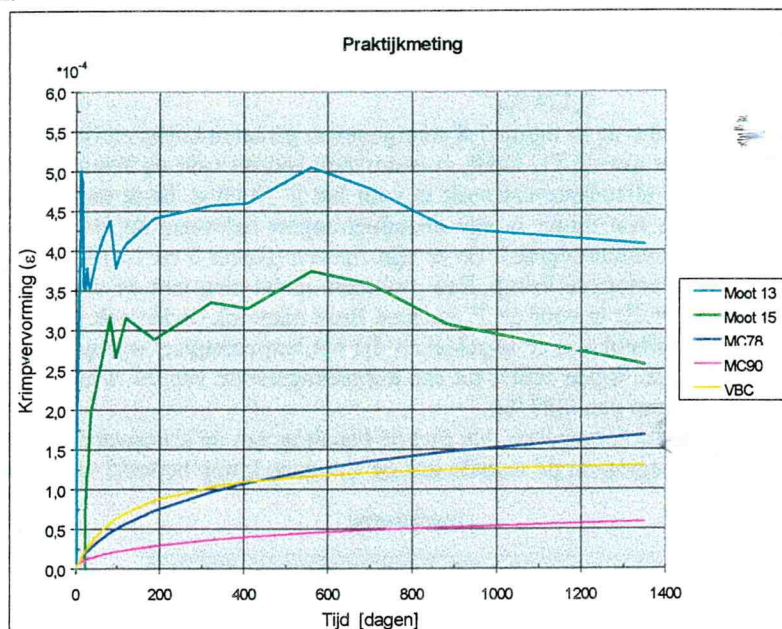
Hieronder zijn de laboratorium metingen aan de krimpvervorming nogmaals, voor de volledigheid, in een figuur weergegeven. Hierin is duidelijk te zien dat ouder beton minder krimpt in de loop van de tijd, wat logischerwijs te verwachten is. De krimpvervorming van beton dat ongeveer een jaar ouder is dan de andere, resulteert in een vermindering van krimpvervorming van ongeveer 35 %.



Figuur 7.7 Het vergelijking van krimpvervormingen bij verschillende ouderdom

Praktijkonderzoek

Op de 2^e Stichtse brug zijn zoals gezegd tegelijkertijd met twee moten nabij het midden van de overspanning, blokken HSB gestort. Wederom dient opgemerkt te worden dat de metingen beïnvloed zijn doordat de dummy's tijdens de bouwperiode regelmatig nat geregend zijn. Ze zijn namelijk onder een gat in het dek geplaatst. De vervorming van de dummy's zijn op drie punten gemeten. De vervormingen zijn per dummy gemiddeld en figuur weergegeven.



Figuur 7.8 Krimpvervorming van de dummy's in de 2^e Stichtse Brug

Het grillige verloop van de krimpvervorming is opvallend. De uitschieters in het begin zijn waarschijnlijk toe te schrijven aan het feit dat de blokken zijn natgeregend. Er valt niet precies te achterhalen op welke data de dummy's nat zijn geworden.

De metingen aan de krimpvervorming van de dummy's hebben plaatsgevonden vanaf 1 dag na ontkisten. Moot 15 is logischerwijs later ontlast dan moot 13, vanwege het feit dat deze moot ook later gestort is. Het verschil in storttijdstippen van de twee moten is 20 dagen. De datum van ontlasten van moot 13, en daarmee de oorsprong van bovenstaande figuur is 27-3-1997. De brug is gesloten op 32 dagen na deze datum. Het eerste deel van de continuïteitsvoerspanning (60%) is op 35 dagen aangebracht. Het tweede deel (80%) op 49 dagen en het laatste deel op 56 dagen. Het asfalt is aangebracht op 110 dagen na ontlasten van moot 13.

In de bovenstaande figuur valt op dat de krimpvervorming afneemt na ongeveer 550 dagen. Deze afname kan ook wel zwellen genoemd worden. Een verklaring hiervoor is moeilijk te geven. De brug is op dat tijdstip allang gesloten, hemelwater kan dus geen oorzaak zijn. Een aantal geopperde mogelijkheden zijn:

- Het relaxeren van spanningen t.g.v. autogene krimp.
- 'Negatieve' uitdrogingskrimp. Door uitdrogingskrimp wordt vocht in de beton verbruikt. De beton droogt dus uit, en zal vervolgens vocht opnemen uit de omgeving. Door deze vochtopname kan de beton gaan zwellen.
- De onderdruk die ten gevolge van autogene krimp optreedt, wordt vermindert door het binnentreden van lucht. Door de onderdruk die optreedt door de autogene krimp, krimpt de beton. Indien nu lucht in de dummy kan toetreden, kan een deel van deze krimp ongedaan worden gemaakt.

Verder valt nog op dat de krimpvervorming van moot 15 achter blijft ten opzichte van moot 13. Het verloop van de krimpvervorming is vrijwel identiek. Een reden hiervoor kan weer zijn dat het meettijdstip na ontlasten van moot 15 een x aantal uren later is dan het meettijdstip na ontlasten van moot 13. In deze x aantal uren kan al een groot deel van de krimpvervorming (verhardingskrimp) zijn opgetreden. De krimpvervorming van moot 13, bereikt binnen 12 dagen ouderdom de piek van 0,5 ‰. Ook weersinvloeden en (kleine) afwijkingen in specie-temperatuur spelen hierin ook een grote rol.

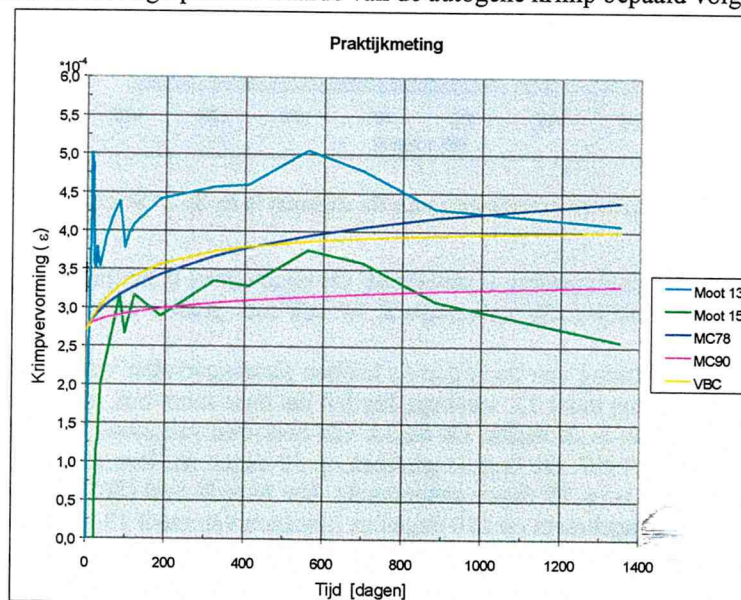
Indien de metingen worden vergeleken met de krimpvervormingen volgens de voorschriften, moet worden opgemerkt dat in de voorschriften geen rekening wordt gehouden met de verhardingskrimp. Dit is de krimp die in de vroege fase van het verhardingsproces plaatsvindt. De verhardingskrimp wordt ook wel autogene krimp genoemd. In de voorschriften wordt alleen rekening gehouden met de uitdrogingskrimp. Zoals als in figuur 7.8 opvalt is een groot deel van de krimpvervorming toe te schrijven aan de verhardingskrimp, indien dus de voorschriften alleen de uitdrogingskrimp beschrijven zullen deze de krimpvervorming ver onderschatten. Dit blijkt ook indien de krimpvervorming volgens de voorschriften berekend wordt. Hieronder is kort weergegeven wat de krimpvervorming volgens de diverse voorschriften is op het tijdstip van 880 dagen.

- Voor de Model Code 1978 is dit: 0,147 %;
- Voor de Model Code 1990 is dit: 0,054 %;
- En voor de VBC is dit: 0,124 %.

Duidelijk mag zijn dat dit ver onder de in figuur 7.8 weergegeven gemeten krimpvervormingen ligt.

Door G.W. Gall [8], afstudeerder aan de TU Delft, is onderzoek gedaan naar de krimp- en temperatuurseffecten in HSB-uitbouwbruggen. In dat afstudeeronderzoek is voor het 2^e Stichtse Brug mengsel een waarde voor de verhardingskrimp gegeven. Er is een figuur in zijn afstudeerrapport aanwezig dat de relatie aangeeft tussen de druksterkte ontwikkeling en de hydratatiegraad. En er zijn figuren (figuur 3 en 14 [8]) aanwezig voor de relatie tussen de hydratatiegraad en de autogene krimp. Een probleem is dat men met de druksterktes die bepaald zijn aan de grenzen van de figuren zit. Er is voor de 2^e Stichtse Brug namelijk onderzoek gedaan naar de druksterkte ontwikkeling (zie eerder dit hoofdstuk) en er is gebleken dat het betonmengsel wat gebruikt is, te kwantificeren is als een B98. De figuren van Gall lopen echter tot een kubusdruksterkte van 90 N/mm². Bij deze sterkte hoort een waarde voor de autogene krimp van 0,27 %.

Hieronder is figuur 7.8 nogmaals weergegeven. Nu met de bepaling van de krimpvervorming volgens de diverse voorschriften. Deze hebben als beginpunt de waarde van de autogene krimp bepaald volgens Gall.



Figuur 7.9 Krimpvervorming van de dummy's met de voorschriften

Door de relatief grote spreiding van de praktijkmetingen aan de dummy's is het niet mogelijk te concluderen welk voorschrift nu de krimpvervorming beter beschrijft. Een oorzaak is het feit dat de dummy's zijn natgeregend. Een andere oorzaak is de spreiding in gemeten vervorming van moot 15 en moot 13. Deze spreiding is op zich niet vreemd. Enkele uren verschil in aanvang van storten en begin meting kan snel enig verschil in gemeten verhardingskrimp geven. Desalniettemin beschrijven de voorschriften samen met de autogene krimp volgens Gall de krimpvervormingen redelijk.

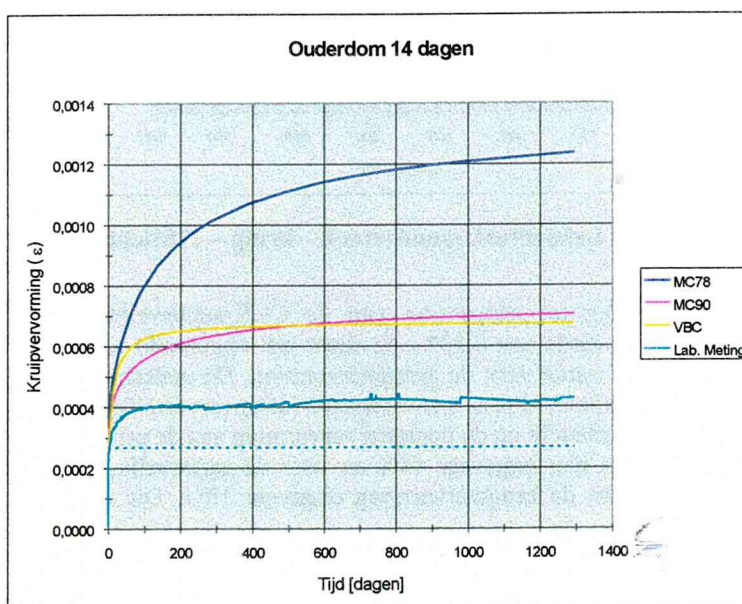
7.2.5 Kruipmetingen

Na een bespreking van de uitgevoerde krimpmetingen aan de 2^e Stichtse Brug zijn nu de kruipmetingen aan de beurt. Deze kruipmetingen hebben plaats gevonden in het laboratorium.

De proefstukken die zijn gebruikt voor de kruipproeven zijn prisma's met de afmetingen van 100 x 100 x 400 mm. Vanwege het feit dat de krimpvervorming gelijktijdig met de kruipvervorming optreedt, moet deze op de kruipvervorming in mindering worden gebracht. Dit is hier gebeurd.

De vervormingen van de prisma's zijn gemeten met L.V.D.T. opnemers. Op deze wijze is continue meting mogelijk.

Om een inzicht te krijgen van het kruipgedrag tijdens de bouw van een uitbouwbrug zijn de volgende drie tijdstippen van belasten gekozen: 14 dagen, 28 dagen en 365 dagen. De kruipproeven zijn uitgevoerd bij 20°C, 50% relatieve vochtigheid en een belastingsniveau van 10 N/mm² bij 14 en 28 dagen ouderdom en 20 N/mm² bij het proefstuk van 365 dagen ouderdom. In het monitoring rapport wordt opgemerkt dat de correctie op de kruip van 28 dagen ouderdom afgeleid is van de krompcurve van 14 dagen oud. Deze correctie betreft het in mindering brengen van de krimp op de gemeten vervormingen. Door toepassing van de krimpcurve van 14 dagen ouderdom, is de kruipfactor en daarmee de kruipvervorming van 28 dagen oud minder betrouwbaar. In het monitoring rapport zijn ook de kruipfactoren weergegeven. Echter door al eerder omschreven redenen is het beter om kruipvervormingen weer te geven. Dit vanwege het verschil in verloop van de elasticiteitsmodulus. Elk voorschrift heeft zijn eigen beschrijving hiervan, de elasticiteitsmoduli wijken onderling en ook naar de praktijk af. Er zou een onjuist vergelijk gemaakt worden indien alleen gekeken wordt naar de kruipfactor.



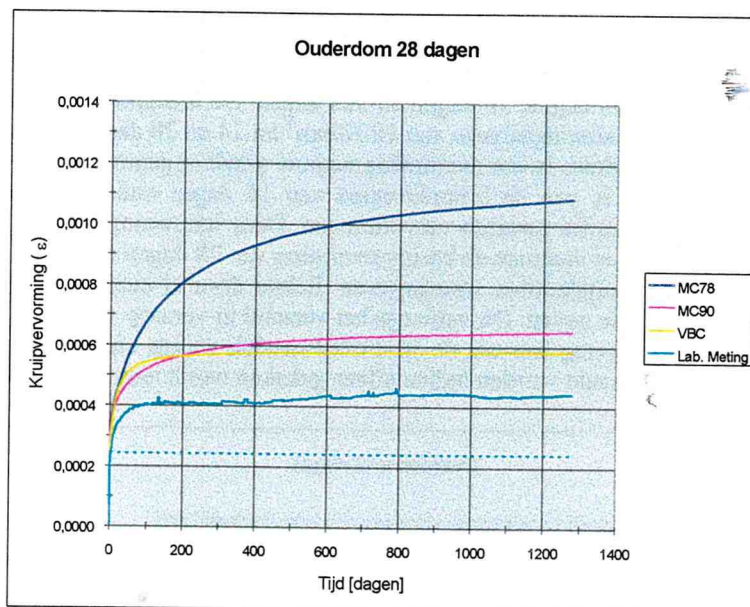
Figuur 7.10 Laboratoriumonderzoek – kruip – 2^e Stichtse Brug

Als eerste is hier de kruipvervorming van de prisma die na 14 dagen ouderdom belast werd weergegeven. In het laboratorium is alleen de vervorming van de prisma gemeten. Omdat de prisma natuurlijk ook krimpt, is de krimpvervorming die hiervoor is bepaald er van af getrokken. De kruipvervorming blijft over. Er dient wederom opgemerkt te worden dat waar hier gesproken wordt over kruipvervorming het gaat over vervorming ten gevolge van kruip samen met de elastische vervorming. De elastische vervorming is ook in de figuur weergegeven. Het betreft de elastische vervorming op het tijdstip van belasten, dus voor bovenstaand figuur is dit σ_1/E_{14} . De elasticiteitsmodulus van prisma is bij 14 dagen ouderdom 37.350 N/mm². Deze is ook terug te vinden in paragraaf 7.2.3.

Het is duidelijk te zien dat de beschrijving van de kruipvervorming volgens Model Code 1990 en de VBC zijn nagenoeg gelijk, en de Model Code 1978 ligt hier ver boven. Dit bleek ook uit Hoofdstuk 4. Allen wijken af van de waarden die gemeten zijn in het laboratorium. Ten opzichte van de lab. meting overschat de Model Code 1990 de vervorming met ongeveer 60%. Indien alleen kijkend naar de kruip, overschat de MC 90 de lab. waarden met meer dan 100%, echter gaat de Model Code 1990 uit van een andere E-modulus waardoor de elastische vervorming ook anders wordt. Vandaar dat ook vergelijk wordt gemaakt met de totale vervorming als uitgangspunt.

Bij de VBC is ook gerekend volgens een aanbeveling voor aanpassing van de CUR-aanbeveling [17]. De CUR-aanbeveling geeft bij een sterkteklasse > B75 aan dat gerekend moet worden met een k_b van 0,6. De aanbeveling op deze CUR-aanbeveling geeft aan dat bij B85 beter gerekend kan worden met een k_b van 0,5. Door hiermee te rekenen wordt de vervorming volgens de VBC gelijk aan 0,61 %. Dit is een overschatting van de vervorming van ongeveer 40%. De aanbeveling tot aanpassing leidt hier tot betere resultaten.

De figuur hieronder geeft de vervorming (ten gevolge van kruip en elastische vervorming) aan voor de prisma die belast is na 28 dagen ouderdom.

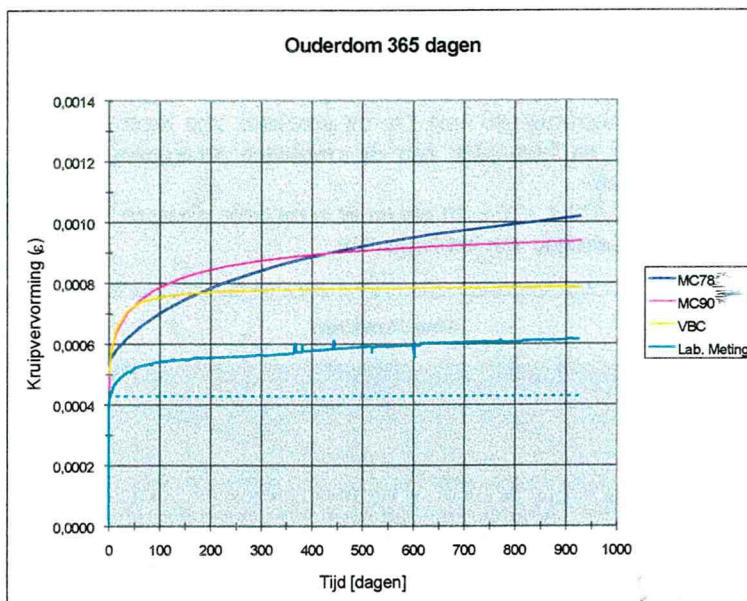


Figuur 7.11 Laboratoriumonderzoek – kruip – 2^e Stichtse Brug

Bij toepassing van de aanbeveling tot aanpassing van de CUR-aanbeveling, komt de berekende VBC vervormingslijn te liggen op een waarde van 0,53%. Er dient wel opgemerkt te worden dat er voor 28 dagen ouderdom geen waarden aanwezig waren voor de krimpvervorming. De onderzoekers van de TU Delft hebben hiertoe de krimpvervorming geëxtrapoleerd naar een verwachte krimpvervorming bij 28 dagen. Op deze wijze is de krimpvervorming in mindering gebracht op de gemeten vervorming aan de prisma die na 28 dagen belast is. De overschatting van de MC 90 is hier ongeveer 44% en voor de aanbeveling tot aanpassing van de CUR-aanbeveling is de overschatting van de kruipvervorming ongeveer 18%. Dit alles bij ongeveer 1100 dagen ouderdom.

Indien hier de kruipvervorming van 28 dagen ouderdom wordt vergeleken met 14 dagen ouderdom valt op dat de vervormingen gemeten in het laboratorium nauwelijks verschillen. Dit is zeer opmerkelijk, verwacht wordt dat er toch een verschil zal zitten tussen de kruipvervorming van 28 dagen ouderdom ten opzichte van 14 dagen ouderdom. Ouder beton, zal namelijk minder kruipen. Indien figuren 7.10 en 7.11 vergeleken worden is dit niet terug te vinden. Dit is deels te verklaren doordat er geen krimpmetingen zijn gedaan aan prisma's van 28 dagen ouderdom. De krimp is zoals gezegd geëxtrapoleerd. Dit verklaart echter de nog relatief hoge kruipvervorming bij 28 dagen niet volledig. Alle prisma's komen uit dezelfde stort. Specie-technisch verschillen zij dus niet. Indien wordt gekeken naar de gemeten druksterkte, is de 14 daagse druksterkte 99,4 MPa en die van 28 dagen ouderdom 105,5 MPa. Dit verschil is niet zo groot, waardoor ook deels verklaart wordt waarom de gemeten vervormingen dicht bij elkaar liggen dan in eerste instantie wordt verwacht. Echter de in figuur 7.10 en 7.11 weergegeven verschillen zijn wel erg minimaal. Hierdoor en het feit dat geen exacte krimpresultaten bekend zijn, zullen in eerste instantie de hier gevonden resultaten niet verder worden gebruikt bij de bepaling van de juistheid van de diverse voorschriften.

Als laatste is hier de figuur weergegeven met de kruipvervormingen van de prisma's die bij 365 dagen ouderdom zijn beproefd.



Figuur 7.12 Laboratoriumonderzoek – kruip – 2^e Stichtse Brug

Opvallend is meteen dat de Model Code 1978 heel anders presteert. De Model Code 1990 presteert ten opzichte van de laboratorium meting ook minder. Indien wederom de aanpassing op de CUR-aanbeveling wordt toegepast komt de VBC op een eindwaarde (bij 730 dagen) uit op een kruipvervorming van 0,74 %.

Wederom kijkend naar het percentage wat de voorschriften de kruipvervorming overschatten, komen we op de volgende waarden: voor de MC90 is de overschatting ongeveer 50 % ten opzichte van de laboratorium meting. De aanpassing van de CUR aanbeveling laat een overschatting van ongeveer 20% zien.

Indien er een vergelijk wordt gemaakt met de vorige twee figuren, dient hier wel opgemerkt te worden dat de prisma uit bovenstaande figuur is belast met een spanning van 20N/mm². Terwijl de vorige prisma's met een spanning van 10 N/mm² belast zijn.

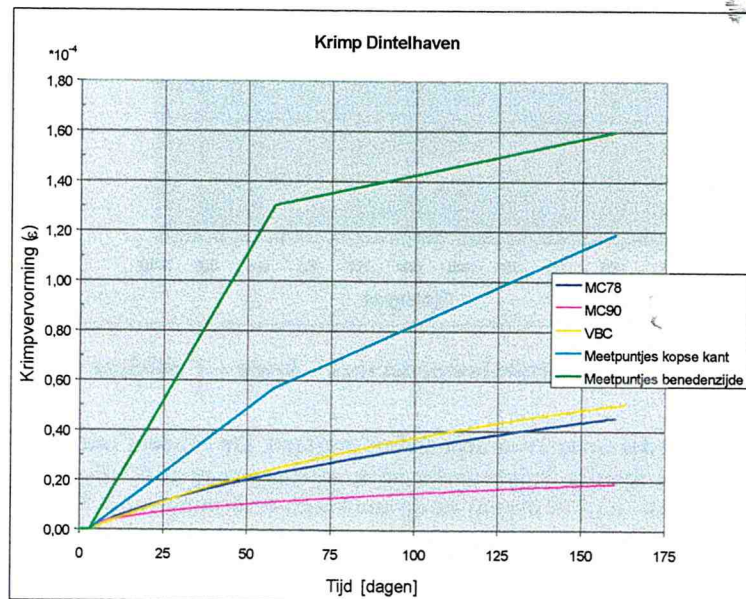
De belasting bij 365 dagen ouderdom is twee keer zo groot. Eenvoudig gezegd mag de kruipvervorming dan ten opzichte van de andere twee figuren gedeeld worden door twee om een indruk te krijgen van de verschillen. Indien dus een belasting van 10 N/mm² op de prisma van 365 dagen zou zijn aangebracht, kan men er van uitgaan dat de kruipvervorming ongeveer 0,3% zou zijn geweest. Dit is dus minder dan de kruipvervorming volgens de andere twee figuren. Beton dat op oudere leeftijd belast wordt kruipt minder. Dit is terug te vinden in de figuren.

Het is moeilijk te concluderen welk voorschrift nu het beste de kruipvervorming beschrijft. De aanbeveling tot aanpassing van de CUR aanbeveling voor de VBC lijkt in ieder geval tot betere resultaten te leiden. Er dient echter wel opgemerkt te worden dat de proeven onder laboratorium omstandigheden hebben plaatsgevonden. Duidelijk mag zijn dat omstandigheden buiten hiervan sterk afwijken. In het laboratorium zijn de prisma's bewaard en beproefd bij een constante temperatuur van 20°C en een constante relatieve vochtigheid van 50%. Terwijl beton buiten / in de praktijk met hele andere omstandigheden te maken heeft. Zo zal de gemiddelde temperatuur ongeveer 10°C zijn. Dit is de gemiddelde jaar temperatuur, er treden dus hele andere temperaturen op door de seizoenscycli en de dag- en nachtcycli. Verder heerst buiten een gemiddelde relatieve vochtigheid van ongeveer 75%.

7.3 Monitoring Westbrug Dintelhaven

Bij de uitbouwbrug van de Westbrug Dintelhaven is ook HSB gebruikt. De betonkwaliteit is B85. Om inzicht te krijgen in de uitdrogingskrimp is ook in de Dintelhaven brug een proefstuk gestort. De dikte hiervan is gelijk aan de dikte van het lijf van de kokerbrug (40 cm). Op dit proefstuk zijn meetpuntjes geplakt. De krimprek is gecorrigeerd voor de temperatuur en hieronder zijn de resultaten weergegeven, samen met de berekende resultaten volgens de diverse normen.

De afmetingen van de dummy zijn 120 x 120 x 40 cm en er is op twee plaatsen van het blok gemeten, te weten aan een kopse kant en aan de benedenzijde van het langsvlak



Figuur 7.13 Krimpvervorming aan de dummy's van de Dintelhaven Brug.

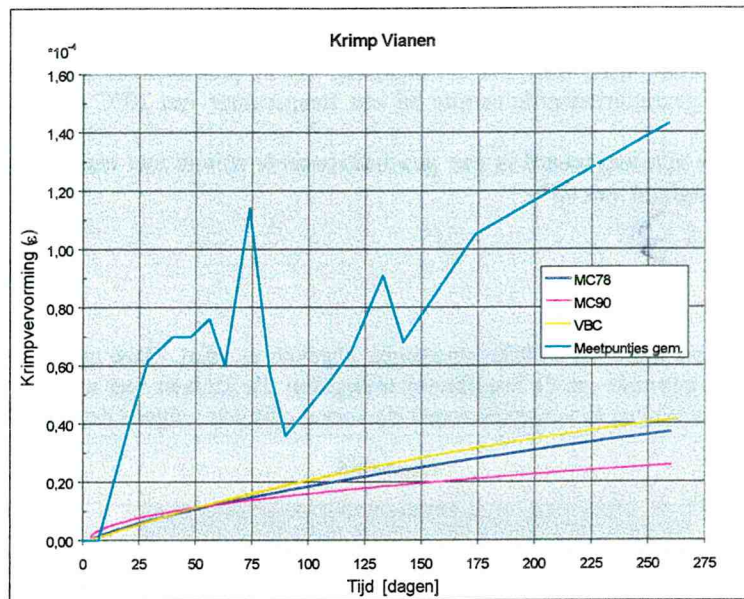
Er hebben slechts drie metingen plaatsgevonden aan deze dummy. Dit is zeer weinig. Door zo weinig meetpunten is niet te zien welk aandeel de verhardingskrimp op het geheel heeft. In de krimpfiguur van de 2^o Stichtse Brug was dit nog enigszins te zien, maar hier is in het begin (de eerste 25 dagen) niet gemeten, zodat niet te zien valt hoe het verloop van de krimpvervorming tot stand gekomen is. Het is zeer waarschijnlijk dat de krimpvervorming in de eerste paar dagen zeer stijl is toegenomen en daarna pas afgevlakt is. In bovenstaande figuur zijn ook geen invloeden terug te vinden van temperatuursveranderingen en veranderingen van relatieve vochtigheid. De eerste meting heeft 4 dagen na storten plaatsgevonden.

De vervormingen die berekend zijn aan de hand van de diverse voorschriften zijn voor de volledigheid wel weergegeven. Er kunnen echter geen conclusies van welke aard dan ook uit de bovenstaande figuur getrokken worden.

7.4 Monitoring Oostbrug Vianen

Bij de uitbouwbrug te Vianen (Oostbrug) is B65 als betonkwaliteit gebruikt. Ook hier wordt de krimp bepaald via een betonnen proefstuk met afmetingen 1,20 x 1,20 x 0,47 m. De dikte komt overeen met de halve dikte van het lijf (0,95 m) van de brugkoker. Daarom is één zijde van het proefstuk met een laag bitumineuze dakbedekking afgedekt om zo een dampdichte laag te creëren. De gemeten krimp aan het proefstuk komt nu overeen met de krimp in de wand van de kokerbrug.

In het onderstaande figuur is de krimprek als functie van de tijd weergegeven. De vervormingen zijn gecorrigeerd voor temperatuur. Het wisselende verloop van de krimprek tussen 50 en 150 dagen is veroorzaakt doordat het proefstuk regelmatig nat geworden is. Ook deze dummy was geplaatst onder een gat in het bovendek van de koker.



Figuur 7.14 Krimpvervorming van de dummy in de brug bij Vianen

Aan dit proefstuk is regelmatig gemeten. Het probleem bij de dummy is echter dat deze regelmatig nat is geworden. Hierdoor kan geen goed vergelijk gemaakt worden met de voorspellingen van de diverse voorschriften. De krimpvervormingen volgens de diverse voorschriften zijn voor de volledigheid wel in de figuur weergegeven. Er dient wel wederom vermeld te worden dat de voorschriften alleen de uitdrogingskrimp beschrijven en niet de verhardingskrimp. Deze verhardingskrimp is bij de dummy wel opgetreden, echter door het grillige verloop (en een gering aantal meetpunten tijdens de eerste 25 dagen ouderdom) is moeilijk waar te nemen wat nu ongeveer de grootte van de verhardingskrimp is. De eerste meting is 7 dagen na storten verricht.

7.5 Onderzoeksrapport TU Delft

Rapport 'Onderzoek eigenschappen beton B65 – Deel 1: Bepaling materiaaleigenschappen' November 1998

Ook de TU Delft voert onderzoeken uit, onder andere in opdracht van de Bouwdienst Rijkswaterstaat. Het hierboven genoemde onderzoek [16] is in dit afstudeer-onderzoek gebruikt vanwege het feit dat er zowel krimp- als kruipproeven hebben plaatsgevonden aan B65.

Dit onderzoek is door de TUD uitgevoerd ter verificatie van de kruipcoëfficiënten zoals vermeld in NEN 6720. Omdat tegelijkertijd met de kruipvervormingen ook vervormingen ten gevolge van krimpeffecten optreden, is parallel aan de kruipmetingen aan twee proefstukken de krimpvervorming gemeten.

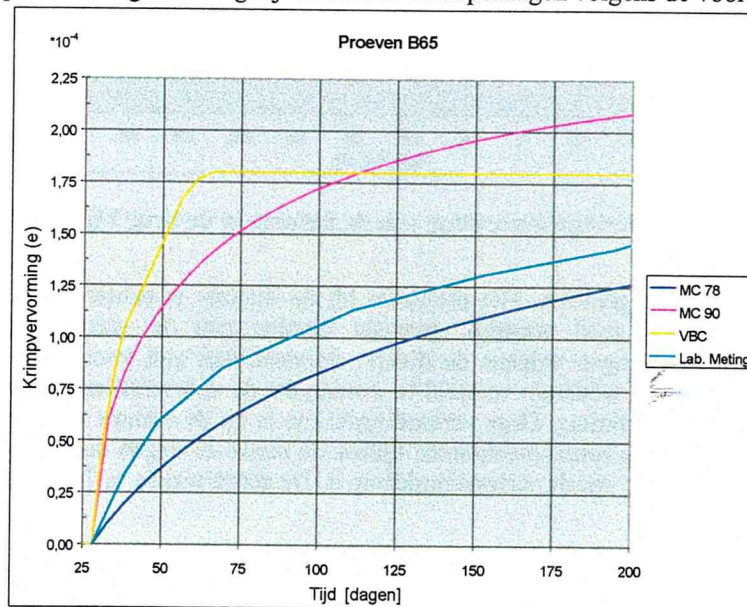
De afmetingen van de proefstukken zijn 100 x 100 x 400 mm. De lengte waarover de kruip- en krimpvervormingen zijn gemeten bedraagt 200 mm. Op deze wijze is de invloed van de spanningsinleiding (meerassig spanningsgedrag) in de proefstukken op het kruipgedrag nagenoeg volledig geëlimineerd.

De proefstukken zijn gestort in stalen prismamallen. Om uitdroging te voorkomen zijn direct na het storten de proefstukken afgedekt met een plastic folie. Na het ontkisten van de proefstukken zijn deze tot het moment van beproeven bewaard in een geconditioneerde ruimte bij een temperatuur van 20°C en een relatieve vochtigheid van 100%.

De krimp- en kruipproeven zijn uitgevoerd in een geconditioneerde ruimte met een constante temperatuur van 20°C en een relatieve vochtigheid van 65%.

7.5.1 Krimpmetingen

Als eerste zullen hier de resultaten van de krimpmetingen gegeven worden. Deze metingen zijn zoals hierboven gemeld, door de TU alleen gebruikt om de kruipfactor te bepalen. Ze kunnen hier echter prima gebruikt worden om de gemeten krimpvervormingen te vergelijken met de voorspellingen volgens de voorschriften.

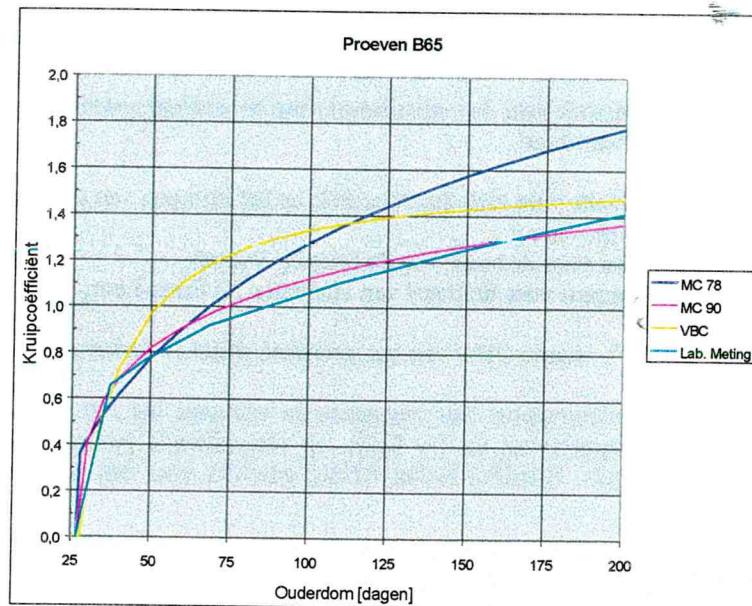


Figuur 7.15 Krimpvervorming bij onderzoek naar eigenschappen van B65 - TUD

In de figuur zijn op bekende wijze de diverse voorschriften en de resultaten van het laboratorium onderzoek weergegeven. Ook hier wordt de VBC voortijdig afgevlakt door de kleine fictieve dikte en het ontbreken van wapening. In dit korte interval blijkt de Model Code 1978 het beste te presteren. De Model Code 1990 en de VBC komen te hoog uit. Opgemerkt dient te worden dat zoals te zien is de krimpvervorming nog een stijgende lijn heeft. Hoeveer de toename van de krimpvervorming nog toeneemt is niet goed te zeggen, vanwege het relatief korte tijdsinterval waarop de proeven zijn gedaan.

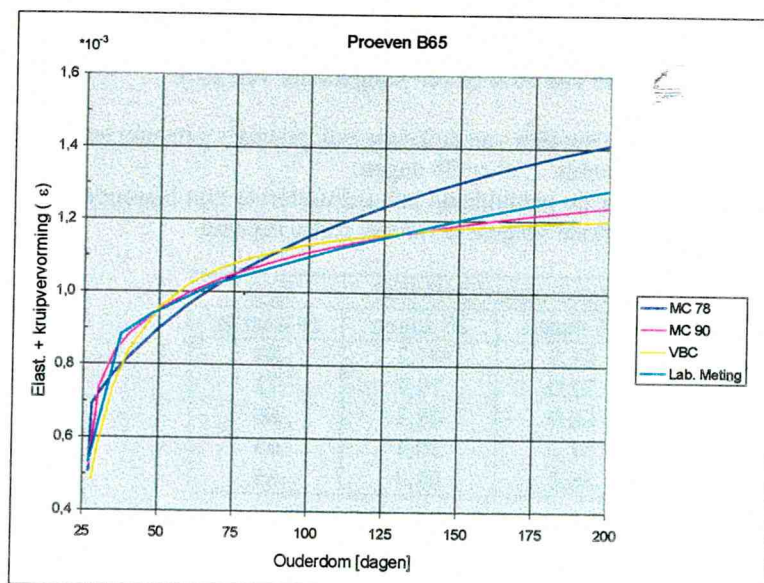
7.5.2 Kruipmetingen

In onderstaande figuur zijn de kruipcoëfficiënten weergegeven, die in het lab zijn gemeten en die volgens de voorschriften zijn berekend. Let wel: dit zijn de kruipcoëfficiënten en niet de kruipvervormingen. In de volgende figuur zijn wel de kruipvervormingen weergegeven. Er is hier bewust gekozen om eens allebei de figuren weer te geven. Er kan nu specifiek gekeken worden naar het verschil tussen de kruipcoëfficiënt en de kruipvervorming (incl. elastische vervorming) bij de diverse voorschriften en de praktijkmeting. Er wordt bij de bepaling van de kruipcoëfficiënt namelijk geen rekening gehouden met het verschil tussen de bepaling van de elasticiteitsmodulus bij de diverse voorschriften.



Figuur 7.16 TU Delft B65 onderzoek

De grafiek van de kruipvervorming wordt bij omzetting van de kruipfactor naar de kruipvervorming bij een zelfde belasting als aangenomen in het onderzoek als volgt:



Figuur 7.17

Wat meteen opvalt is dat de afwijkingen tussen de voorschriften en de lab. meting verschillend zijn. De afwijkingen liggen ten opzichte van de kruipfactor dichter bij elkaar. Het blijkt dus dat het goed is om de kruipvervormingen te vergelijken en niet de kruipfactoren.

Er blijkt dat de CEB-FIP Model Code 1990 een goede voorspelling geeft ten aanzien van de kruipvervorming. En ook hier geven de Model Code 90 en de VBC zo goed als dezelfde resultaten. De Model Code 1978 overschat zoals te verwachten is de kruipvervorming.

7.6 Onderzoeksrapport TU Delft

Rapport 'Onderzoek eigenschappen beton B65, in het bijzonder het krimpgedrag van verschillende betonmengsels' – Juni 2000 [17].

Omschrijving: 'Experimenteel onderzoek naar de verhardingskrimp en uitdrogingskrimp van betonmengsels B65 in de eerste drie maanden van de levensduur'.

Dit onderzoeksrapport van de TU Delft richt zich dus specifiek op het krimpen van diverse B65-mengsels. In het rapport zijn 4 mengsels onderzocht te weten:

- het mengsel "Vianen", toegepast voor de bouw van de brug bij Vianen;
- het mengsel "Etten-Leur", toegepast voor de bouw van viaducten bij Etten-Leur;
- het mengsel "TUD/SPOD",
- het mengsel "B65 met Liapor", waarin 25% van het gebroken grind is vervangen door 100 % met water verzadigd Liapor.

Dit laatste mengsel is in dit afstudeerrapport niet meegenomen vanwege het feit dat het een experimenteel mengsel is en in het onderzoeksrapport van de TU Delft, op verschillende punten qua meetresultaten sterk afwijkt van de andere drie mengsels. Hierdoor is het weinig geschikt voor een realistisch vergelijk met de diverse voorschriften.

Het onderzoek van de TU Delft is verricht naar de verhardingskrimp en de uitdrogingskrimp van de B65-mengsels. Zoals gebleken is wordt er in de voorschriften geen rekening gehouden met verhardingskrimp, daarom zijn in dit afstudeeronderzoek de resultaten van het onderzoek naar de verhardingskrimp buiten beschouwing gelaten. Een mogelijkheid zou zijn het toepassen van de formulerings volgens Gall [8] zoals deze ook zijn gebruikt bij de monitoring-gegevens van de 2^e Stichtse Brug. Echter zijn de grafieken opgesteld door Gall gebaseerd op het betonmengsel van de 2^e Stichtse Brug. Vandaar dat die resultaten hier niet gebruikt zullen worden.

De krimpmetingen zijn uitgevoerd aan prisma's, afmetingen 100x100x400 mm³, die zijn gestort in stalen mallen. Per mengsel zijn een aantal prisma's gemaakt, die direct na ontkisten zijn geseald. De sealing is verwijderd na respectievelijk 7, 14 en 28 dagen. Na verwijderen van de sealing zijn de proefstukken in een klimaatruimte geplaatst met een relatieve vochtigheid van 50% en een temperatuur van 20°C.

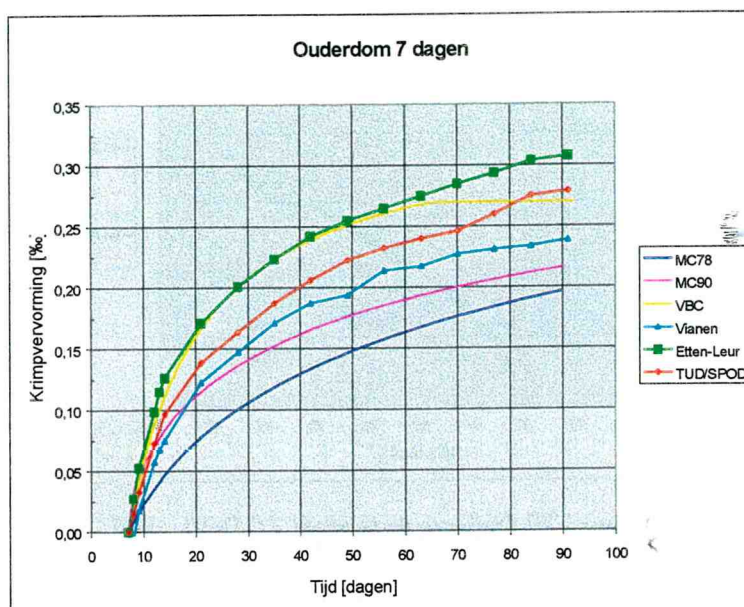
Verder zijn er naast prisma's voor het bepalen van de krimp ook prisma's gemaakt ten behoeven van de bepaling van de kubusdruksterkte na respectievelijk 7, 14 en 28 dagen.

De resultaten van het onderzoek naar de gemiddelde kubusdruksterkte zijn hieronder weergegeven, verder zijn ook de waarden van de kubusdruksterkten volgens de model codes bepaald.

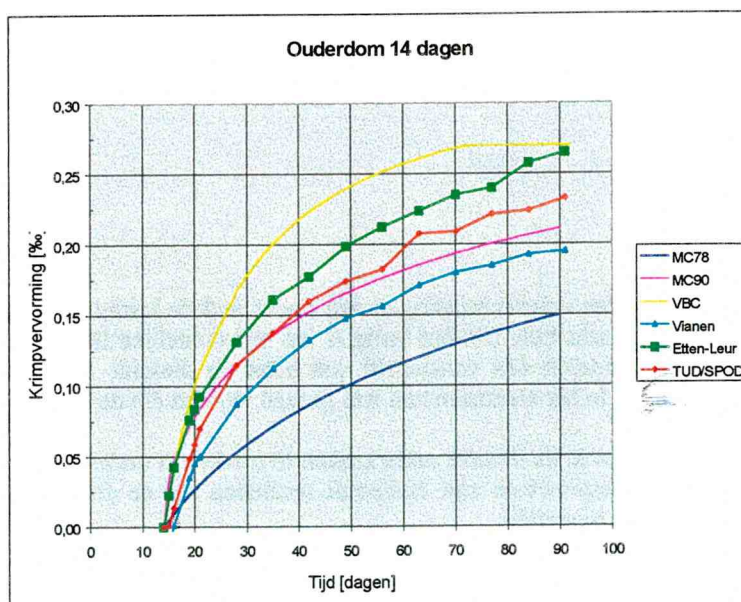
Mengsel	Gemiddelde kubusdruksterkte [MPa]			$f_{ck,28}$ B-waarde
	7 dagen	14 dagen	28 dagen	
Vianen	72,5	81,9	91,3	83
Etten-Leur	61,2	72,0	79,9	72
TUD/SPOD	62,7	66,9	68,3	60
MC – 78	41,9	51,1	58,4	65
MC – 90	49,1	56,8	63,0	65

Zoals al eerder vermeld, onderschat de Model Code 1978 de sterkte ontwikkeling voor hogesterkte beton. Dit is ook hier terug te vinden.

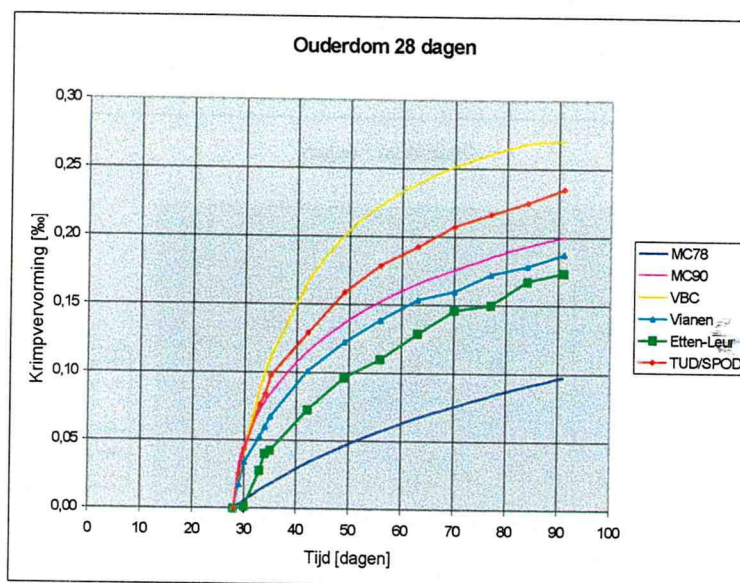
De krimp van de 3 mengsels en de krimp volgens de diverse voorschriften is weergegeven in de figuren 7.17 t/m 7.19. De figuren geven de krimpvervormingen aan na respectievelijk 7,14 en 28 dagen. Het tijdsinterval waarover gemeten is, is jammergenoeg zeer kort.



Figuur 7.18 Onderzoeksrapport TU Delft – B65



Figuur 7.19 Onderzoeksrapport TU Delft – B65



Figuur 7.20 Onderzoeksrapport TU Delft – B65

Alle drie de figuren in ogenschouw nemend, blijkt de Model Code 1990 het beste te presteren. Er valt duidelijk te zien dat het ene B65 mengsel het andere niet is. De resultaten van de krimpvervormingen liggen nog redelijk uiteen. Dit is ook te zien bij de sterkte-ontwikkeling van deze drie mengsels. Ze zijn allen samengesteld met het uitgangspunt B65, twee van de drie komen hier ver boven uit, de derde zit hier net onder. Wanneer dan naar het gemiddelde van deze drie mengsels wordt gekeken, wordt de krimpvervorming het beste voorspeld door de Model Code 90.

7.7 Conclusie

In dit hoofdstuk zijn praktijk- en laboratoriummetingen aan onder andere krimp en kruip vergeleken met de voorspellingen van de diverse voorschriften. Dat het lastig is om een duidelijke lijn in de resultaten te krijgen, moge duidelijk zijn. Er is niet duidelijk één voorschrift wat beter de praktijk- en laboratoriumonderzoeken benadert dan een ander voorschrift. In het algemeen kan wel gezegd worden dat de Model Code 1990 gemiddeld het beste presteert.

De redenen dat er geen duidelijk lijn in de diverse onderzoeken te trekken is onder andere vanwege het feit dat de meetresultaten niet altijd even betrouwbaar zijn. Indien de resultaten van de diverse onderzoeken opgesomd worden, komen we tot het volgende overzicht:

- Het laboratoriumonderzoek voor de krimpmetingen van de 2^e Stichtse Brug is wel betrouwbaar, maar de voorspellingen van de voorschriften zijn niet betrouwbaar. De proefstukken zijn namelijk eerst een bepaalde tijd op het werk (buiten) bewaard, voordat ze naar het laboratorium zijn gebracht en vervolgens beproefd zijn. Dit is niet modelleerbaar volgens de voorschriften. Er is wel een poging gedaan, alleen mogen hier nooit harde conclusies uit getrokken worden.
- Bij het praktijkonderzoek voor de krimpmetingen van de 2^e Stichtse Brug zijn de praktijkmetingen en de voorspellingen van de voorschriften beide niet betrouwbaar. De dummy's in de brug waaraan de praktijkmetingen hebben plaatsgevonden zijn verschillende keren natgeregend. De voorspellingen van de voorschriften zijn niet bruikbaar, vanwege het feit dat de voorschriften de verhardingskrimp niet modelleren terwijl deze wel zijn op getreden. Deze verhardingskrimp is niet via een betrouwbare manier te verdisconteren.
- Bij het laboratoriumonderzoek voor de kruipmetingen van de 2^e Stichtse Brug zijn een drietal prisma's beproefd. Hiervan is er één niet volledig betrouwbaar. De verkortingen die gemeten zijn aan de prisma's moeten worden verminderd met de krimpvervorming om tot kruipvervorming te komen. Van één prisma (belast na 28 dagen ouderdom) waren echter geen krimpgegevens bekend. Om deze reden zijn andere krimpgegevens geëxtrapoleerd om toch tot een vergelijk te komen.

- Bij het monitoren van de Dintelhavenbrug (westbrug) is de krimpvervorming aan dummy's gemeten. Deze praktijkmetingen zijn ook niet geheel betrouwbaar. Er zijn in een tijdsbestek van ongeveer 160 dagen 3 metingen verricht. Dit is zeer weinig. Vooral om te kunnen nagaan welk aandeel de verhardingskrimp heeft gehad. Zoals al vermeld kunnen de voorschriften deze verhardingskrimp niet voorspellen, waardoor het vergelijk van de voorschriften met de praktijkmetingen zinloos is.
- Bij het monitoren van de brug bij Vianen, is net als bij de Dintelhavenbrug en de 2^e Stichtse Brug een dummy in de koker geplaatst. Hieraan zijn krimpvervormingen gemeten, ook deze dummy heeft onder een gat in het dek gestaan en is daardoor verscheidene malen natgeregend. Hierdoor zijn de metingen niet betrouwbaar en ook hier geldt dat de voorschriften de verhardingskrimp niet juist kunnen voorspellen waardoor een vergelijk niet zinvol is.
- Bij het laboratoriumonderzoek voor de krimpmetingen van de TU Delft (H. 7.5) zijn de prisma's beproefd onder geconditioneerde omstandigheden, te weten bij een relatieve vochtigheid van 65% en een constante temperatuur van 20°C. Bij deze proeven presteert de Model Code 1978 het best.
- Bij hetzelfde laboratoriumonderzoek zijn ook kruipmetingen verricht. Bij dezelfde omstandigheden, blijkt de Model Code 1990 het best te presteren. De afwijking van de MC 90 is ongeveer 4%, de afwijking van de MC 78 is ongeveer 10%. De VBC zit hiertussen. In principe voorspellen alle voorschriften de kruipvervormingen onder deze omstandigheden goed.
- Bij het volgende laboratoriumonderzoek van de TU Delft (H. 7.6) is ook onderzoek gedaan naar krimpmetingen. Er zijn drie mengsels onderzocht, waarbij de sealing verwijderd is na een drietal verschillende tijdstippen. Gemiddeld gezien presteert hier de Model Code 1990 het best. De Model Code 1978 onderschat de krimpvervormingen, en de VBC overschat de krimpvervormingen in haar voorspellingen.

De CEB-FIP Model Code 1990 lijkt, in het totaal gezien, het beste de krimp- en kruipvervormingen te voorspellen. De VBC met de CUR-aanbeveling voor hogesterkte beton, wijkt hier weinig van af. De Model Code 1978 presteert, zoals al in een eerder hoofdstuk werd verwacht, slecht voor de hogere sterkteklassen.

Er dient echter opgemerkt te worden dat alle metingen die zijn verricht onder praktijkomstandigheden, niet of slecht bruikbaar blijken te zijn voor een vergelijk met de voorschriften.

Verder is opvallend dat daar waar metingen zijn verricht onder geconditioneerde omstandigheden, de voorschriften nog redelijk afwijken met de voorspellingen van de krimp- en kruipvervormingen. Dit terwijl voor het ontwerpen van de voorschriften, er ook talloze van dergelijke proeven hebben plaatsgevonden. Wederom blijkt dat beton een materiaal is dat moeilijk te modelleren is via formules.

8 Vergelijking berekende en gemeten waarden 2^e Stichtse Brug

8.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de 2^e Stichtse Brug doorgerekend met het programma Bridges. Er is voor een uitgebreide analyse van de 2^e Stichtse Brug gekozen vanwege het feit dat dit een recente brug in hoge sterkte beton is, de eerste uitbouwbrug in B85. Deze brug wordt vanuit het oogpunt van onderzoek uitgebreid gemonitord.

Er zal in dit hoofdstuk onderzoek plaatsvinden naar het vervormingsgedrag na sluiten en asfalteren. De hoogtemetingen die uitgevoerd zijn in de loop der tijd zullen verwerkt en vergeleken worden met de ontwerp-berekening. Verder zullen berekeningen uitgevoerd worden volgens de voorschriften, maar ook met aangepaste waarden die volgden uit Hoofdstuk 7.

Ook zal er onderzoek plaats vinden naar het vervormingsgedrag tijdens de bouw van de brug. In de brug zijn meetpunten aangebracht. Deze meetpunten bevinden zich in een aantal moten. Hiermee worden de vervormingen van de moot bepaald. Er zal in dit hoofdstuk dan ook een vergelijk worden gemaakt tussen de gemeten vervorming van deze meetpunten en een berekening volgens Bridges.

Als eerste zal er algemene informatie van de brug worden gegeven. Aan de hand hiervan zullen verderop in dit hoofdstuk de berekeningen worden uitgevoerd.

8.2 Algemeen

Zoals bekend kan Bridges niet rekenen volgens de Model Code 1990. Hiervoor is in Hoofdstuk 5 een modellering gemaakt aan de hand van curve-fitting, waarmee de MC 90 gesimuleerd kan worden in Bridges. De simulering heeft een aantal uitgangspunten, te weten de betonklasse, de relatieve vochtigheid, het tijdstip van belasten, de fictieve dikte en de temperatuur.

Om een goede berekening en onderzoek te kunnen maken, moeten de uitgangspunten zo reëel mogelijk in de berekening worden meegenomen. De waarden van relatieve vochtigheid en temperatuur zijn in het vorige hoofdstuk al weergegeven in Figuur 7.1. De gemiddelde waarden uit deze figuur zullen in de berekening worden meegenomen.

Het tijdstip van belasten en de fictieve dikte zullen bepaald worden aan de hand van zo reëel mogelijke waarden, daarvoor is deze paragraaf.

Wat ook in deze paragraaf wordt behandeld is de bepaling van het materialen bestand voor de praktijkwaarden. In hoofdstuk 7 zijn de elasticiteitsmodulus, de sterkteontwikkeling, de krimp en de kruip bekend geworden van de 2^e Stichtse Brug. Deze betoneigenschappen zijn bekend geworden via het monitoring-rapport. Aan de hand hiervan zal ook een materialen bestand gemaakt worden, welke als doel zal hebben de realiteit zo goed mogelijk te benaderen. Men kan er van uit gaan dat wanneer dergelijke betoneigenschappen bekend zijn, dit tot betere resultaten zal leiden wat betreft het vervormingsgedrag tijdens en na de bouw.

De sterkte- en elasticiteitsontwikkeling kunnen direct in het materialen-bestand toegepast worden. Bij de resultaten van de krimp- en kruiponderzoeken ligt dit echter anders. Om deze waarden toe te passen in het materialen-bestand zal wederom een curve-fitting plaats moeten vinden, om een juiste basiskruip- en -krimpfactor te vinden. Deze curve-fitting zal ook besproken worden in deze paragraaf.

8.2.1 *Bepaling fictieve dikte*

Hier zullen de fictieve diktes van de diverse moten worden weergegeven. Deze waarden komen uit Bridges. In Bridges is ten behoeve van de ontwerp-berekening de gehele constructie al ingevoerd. Bridges heeft de handige optie, dat deze de fictieve dikte per moot kan berekenen, zodat dit niet met de hand gedaan hoeft te worden. Aangezien elke moot een andere fictieve dikte heeft, en ook elke moot een andere hoogte kan er niet zomaar een gemiddelde worden berekend. Hieronder zal de fictieve dikte op 3 verschillende wijze worden bepaald. Er is namelijk niet een eenduidige berekeningswijze voor een dergelijke berekening.

Moot nr.	Nr. in Bridges	Fict. dikte	Moot-lengte
1	22	0,467	4
2	23	0,452	4
3	24	0,438	4
4	25	0,423	4
5	26	0,409	4
6	27	0,398	5
7	28	0,384	5
8	29	0,373	5
9	30	0,366	5
10	31	0,357	5
11	32	0,351	5
12	33	0,346	5
13	34	0,345	5
14	35	0,341	5
15	36	0,340	5

- Als eerste zal de fictieve dikte bepaald worden aan de hand van het gemiddelde.
Gemiddelde fictieve dikte over deze 15 moten: 0,39 m.
- Een andere manier is het bepalen van de fictieve dikte op 1/3 van de kraagarm. Op deze wijze wordt beter rekening gehouden met de verschillende afmetingen van de moten.
Moot 6 ligt op 1/3 van de kraagarm, de fictieve dikte daar is 0,398 m.
- Als laatste manier kan ook rekening worden gehouden met alleen de fictieve dikte en de mootlengten. Hiertoe wordt het hoogteverloop buiten beschouwing gelaten.
Cum. gem. fictieve dikte: $0,38 \text{ m. } (0,467+0,452+0,\dots)\times 4 + (\dots+\dots+\dots)\times 5 + \dots = \dots / 70 = 0,38 \text{ m.}$

Welke manier gebruikt wordt maakt niet veel uit, de waarden liggen zeer dicht bij elkaar. Een fictieve dikte van 400 mm is een goed uitgangspunt en zal ook worden aangehouden bij het bepalen van de getunede basis krimp- en kruipwaarden voor het rekenen volgens de MC90. Het verschil tussen de bepaling van de getunede waarden aan de hand van een fictieve dikte van 0,38 of 0,4 is marginaal, vandaar dat 400 mm gekozen is. Deze waarde komt goed overeen met de al gekozen waarden eerder in dit afstudeeronderzoek.

8.2.2 *Tijdstippen van belasten*

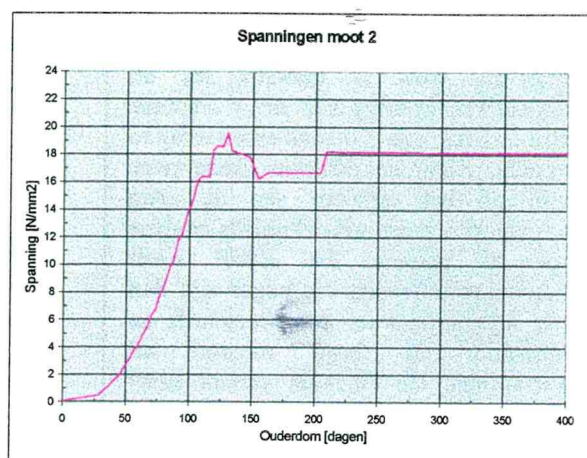
Ook het tijdstip van belasten is van belang bij het bepalen van de basiskruipfactor voor de MC 90*. Zoals te zien in Figuur 5.4.

De hieronder gegeven waarden zijn de tijdstippen van storten van de diverse moten. Het tijdstip van belasten van een gestorte moot (en de voorgaande moten) is het tijdstip waarop de bekisting is weggehaald en wanneer er wordt voorgespannen. Dit is voor de moten 3 dagen na storten, en voor de hamerstukken en einddwarsdragers ongeveer een week.

Steunpunt 1	sluutmoot 2 oost 15	moot 2 oost 14	.....	moot 2 oost 1	hamerstuk steunpunt 2	moot 2 west 1	.....	moot 2 west 14	moot 2 west 15	sluutmoot	moot 3 oost 15	moot 3 oost 14	.....	moot 3 oost 1	hamerstuk steunpunt 3	moot 3 west 1	.....	moot 3 west 14	sluutmoot 3 west 15	steunpunt 4
35	164	153		48	0	49		153	167	339	325	315		202	160	201		315	327	207

Het mag duidelijk zijn dat het tijdstip van belasten voor elke moot verschilt. Met het storten en voorspannen van elke nieuwe moot wordt een stukje extra belasting aangebracht. Verder wordt na sluiten het statische systeem anders waardoor ook de belastingafdracht verandert, de continuïteitskabels worden gespannen, de schampkanten en asfalt worden aangebracht. Hierdoor is het moeilijk om één tijdstip van belasten te kiezen. Binnen Bridges hoeft dit ook niet, maar voor de bepaling van de basiskruipcoëfficiënt om de MC90* toe te passen, is dit wel nodig.

Kijkend naar Figuur 5.4 blijkt weer dat het voor B85 niet uitmaakt welk tijdstip van belasten wordt gekozen, omdat het verloop van de getunedede waarde voor de basiskruipcoëfficiënt voor B85 constant is. Voor B45 en B65 is het verloop beperkt. Vooral wanneer men er zich van bewust is dat de meeste moten 6 weken of meer oud zijn voordat er zodanige spanningen op de mootdelen staan, dat ze kruipvervorming van betekenis gaan geven. Hiernaast is de opbouw van spanningen te zien voor moot 3 oost 2 van het tijdstip van ontkisten van deze moot. De sprongen na 150 dagen ouderdom geven o.a. het aanbrengen van de continuïteitsvoorspanning en het asfalteren weer. De spanningen zijn berekend met Bridges en geven de spanningen onder aan de moot weer.



8.2.3 De materialen - bestanden

In deze paragraaf zullen verschillende materialen-bestanden te zien zijn, welke gebruikt worden voor de vervormings-berekening van de 2^e Stichtse Brug met Bridges. Als eerste zal het materialen-bestand te zien zijn, welke is gebruikt voor de ontwerp-berekening. Vervolgens het materialen-bestand volgens de Model Code 1978 en de Model Code 1990*. Waarin de laatste de getunedede Model Code 1990 is. Hierin zijn de elasticiteit-modulus en sterkte-ontwikkeling bepaald volgende de MC 90, en de krimp- en kruipcoëfficiënten bepaald volgens de tuning van Hoofdstuk 5.

Er is ook een materialen-bestand aanwezig waarin de beton-eigenschappen zijn meegenomen, welke in het vorige hoofdstuk bepaald zijn in het monitoringsonderzoek. Dit materialen-bestand waarin de gemeten beton-eigenschappen aanwezig zijn, is bedoeld om de praktijk zo goed mogelijk te simuleren.

Wapening en voorspanning

In Hoofdstuk 2 (Verkenning Bridges), is duidelijk geworden dat het materialen-bestand in principe uit 3 materialen bestaat. Ten eerste de beton, vervolgens de wapening en als laatste de voorspanning. Hiernaast zijn de laatste twee materialen weergegeven. Deze zijn ongeacht het voorschrift en de monitoringresultaten overal hetzelfde.

Bij de 2^e Stichtse Brug is als betonstaal FEB500 toegepast en als voorspanning is FeP1860 gebruikt.

Material 2	
FeB500	
For failure analysis: 5 point diagram	
Strain -0.0325	stress -435.0
-0.02175	-435.0
0.0	0.0
0.02175	435.0
0.0325	435.0
For construction: MODEL 1	
Modulus	: 200000
Dilatancy	: 0.000010
Dead weight	: 7500
Material 3	
FeP1860	
For Failure analysis: 5 point diagram	
Strain -0.0325	stress -435.0
-0.02175	-435.0
0.0	0.0
0.007605	1521
0.035	1690
For construction: MODEL 1	
Modulus	: 200000
Dilatancy	: 0.000010
Dead weight	: 7500

Figuur 8.1 Materialen-bestand met betonstaal en voorspanning

Ontwerp-berekening

Hiernaast is het materialen-bestand gegeven, welk is gebruikt bij de ontwerp-berekening van de 2^e Stichtse Brug. Hierin zijn 2 betonklassen terug te vinden, B85P en B85Min. Deze twee zijn bij het ontwerp van de brug toegepast om een gevoeligheids-analyse toe te passen. De B85P heeft betoneigenschappen die hoger zijn dan het uitgangspunt van een voorschrift, en waardoor de brug minder zal vervormen. De B85Min variant heeft vanzelfsprekend de eigenschappen die lager zijn dan het uitgangspunt van dat voorschrift en waardoor de brug meer zal vervormen.

Wat verder nog opvalt is dat er gekozen is voor een cementfactor van 1. Dit is opvallend omdat volgens de Model Code 1978, het uitgangspunt van Bridges, bij hogesterktebeton gekozen moet worden voor een cementfactor van 3. De cementfactor van 1 wordt toegepast bij normaalhardend cement.

There are 4 materials in this DataBase

Material 1
B85P

For failure analysis: 3 point diagram
strain -0.003 stress -50.0
-0.0018 -50.0
0.0000 0.0

For construction: MODEL 2

Maturity:	2 days	Modulus :	27917	Strength:	25.4
Maturity:	3 days	Modulus :	31823		37.6
Maturity:	7 days	Modulus :	36802		58.1
Maturity:	14 days	Modulus :	39329		71.0
Maturity:	28 days	Modulus :	41105		81.0
Maturity:	100 days	Modulus :	43221		94.2
Maturity:	300 days	Modulus :	44337		101.7
Maturity:	1000 days	Modulus :	45121		107.1
Maturity:	3000 days	Modulus :	45586		110.5
Maturity:	10000 days	Modulus :	45920		112.9

Dilatancy : 0.000010
Dead weight : 2599.39
Cement coefficient: 1

Humidity	Shrinkage	Creep	Coefficient fictive thickness
100	0.000000	0.570	30
90	-0.000109	0.657	5
70	-0.000264	0.828	1.5
40	-0.000376	1.086	1

Material 2
B85MIN

For failure analysis: 3 point diagram
strain -0.003 stress -50.0
-0.0018 -50.0
0.0000 0.0

For construction: MODEL 2

Maturity:	2 days	Modulus :	25268	Strength:	18.8
Maturity:	3 days	Modulus :	28803		27.9
Maturity:	7 days	Modulus :	33310		43.1
Maturity:	14 days	Modulus :	35597		52.6
Maturity:	28 days	Modulus :	37205		60.1
Maturity:	100 days	Modulus :	39120		69.8
Maturity:	300 days	Modulus :	40130		75.4
Maturity:	1000 days	Modulus :	40840		79.4
Maturity:	3000 days	Modulus :	41260		81.9
Maturity:	10000 days	Modulus :	41563		83.7

Dilatancy : 0.000010
Dead weight : 2599.39
Cement coefficient: 1

Humidity	Shrinkage	Creep	Coefficient fictive thickness
100	0.000000	0.856	30
90	-0.000163	0.985	5
70	-0.000396	1.242	1.5
40	-0.000564	1.630	1

Figuur 8.2 Materialen-bestand voor ontwerp-berekening

MC 78

Hiernaast is het materialen-bestand gegeven zoals dat gebruikt dient te worden volgens de Model Code 1978. Er zijn hier alleen de betoneigenschappen weergegeven, omdat de eigenschappen van de betonstaal en de voorspanning in figuur 8.1 al zijn gegeven.

Hier zijn dus de elasticiteitsmodulus, de betonsterkte, de cementfactor en de basiskrimp- en kruipfactoren te vinden zoals ze volgens de MC 78 bepaald dienen te worden. Hier is dus wel een cementfactor van 3 toegepast.

De ontwikkeling van de E-modulus in de tijd wordt berekend volgens formule A.1.4 en A.1.3. Uit bijlage A. In deze formules wordt $f_{cm}(28)$ berekend volgens:

$f_{cm}(28) = 0,8 \cdot (f_{ck} + 8)$. De vermenigvuldiging met 0,8 vindt volgens de Model Code 1978 plaats om kubusdruksterkte om te rekenen naar cylinderdruksterkte.

De sterkte-ontwikkeling in figuur 8.3 is berekend volgens formule A.1.3, waarin de betondruksterkte is opgenomen in de E-modulus.

Material 1
B85

For failure analysis: 3 point diagram
strain -0.003 stress -50.0
-0.00175 -50.0
0.0000 0.0

For construction: MODEL 2

Maturity:	2 days	Modulus :	27126	Strength:	23.3
Maturity:	3 days	Modulus :	30925		34.5
Maturity:	7 days	Modulus :	35769		53.4
Maturity:	14 days	Modulus :	38228		65.2
Maturity:	28 days	Modulus :	39956		74.4
Maturity:	100 days	Modulus :	42015		86.5
Maturity:	300 days	Modulus :	43101		93.4
Maturity:	1000 days	Modulus :	43864		98.4
Maturity:	3000 days	Modulus :	44316		101.5
Maturity:	10000 days	Modulus :	44641		103.8

Dilatancy : 0.000010
Dead weight : 2599.39
Cement coefficient: 3

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 8.3 Materialen-bestand volgens de Model Code 1978

MC90*

Bij het materialen-bestand volgens de MC90*, zijn de E-modulus en de sterkte-ontwikkeling bepaald volgens de Model Code 1990. De basiskrimp- en kruipfactoren zijn bepaald volgens de bekende tuningmethode, die in hoofdstuk 5 is uitgevoerd. De waarden volgens deze tuning zijn bepaald bij 75% relatieve vochtigheid en zijn in het materialen-bestand geëxtrapoleerd voor 90% en 70% relatieve vochtigheid. Zoals bekend interpoleert Bridges lineair. Als Bridges dus lineair interpoleert om de basiskrimp- en kruipfactoren te bepalen bij 75%, zullen de gewenste waarden gevonden worden. Vandaar dat ook voor 40% relatieve vochtigheid geen waarden zijn weergegeven.

Ook hier is een cementfactor van 3 toegepast. Deze is vanzelfsprekend ook gebruikt bij de tuningmethode in Hoofdstuk 5. De E-modulus is volgens formule A.2.3 en verder berekend. De sterkte-ontwikkeling volgens formule A.2.4.

Material 1			
B85			
For failure analysis: 3 point diagram			
strain		stress	-50.0
-0.00175		-50.0	
0.0000		0.0	
For construction: MODEL 2			
Maturity:	2 days	Modulus :	23271 Strength: 29.3
Maturity:	3 days	Modulus :	26513 38.0
Maturity:	7 days	Modulus :	32398 56.8
Maturity:	14 days	Modulus :	36213 70.9
Maturity:	28 days	Modulus :	39178 83.0
Maturity:	100 days	Modulus :	42844 99.3
Maturity:	300 days	Modulus :	44704 108.1
Maturity:	1000 days	Modulus :	45893 113.9
Maturity:	3000 days	Modulus :	46514 117.0
Maturity:	10000 days	Modulus :	46902 119.0
Dilatancy		: 0.000010	
Dead weight		: 2599.39	
Cement coefficient:		3	
Humidity	Shrinkage	Creep	Coefficient fictive thickness
100	0.00000	0.0	30
90	-0.000046	0.16	5
70	-0.000138	0.48	1.5
40	-0.00000	0.0	1

Figuur 8.4 Materialen-bestand volgens de Model Code 1990

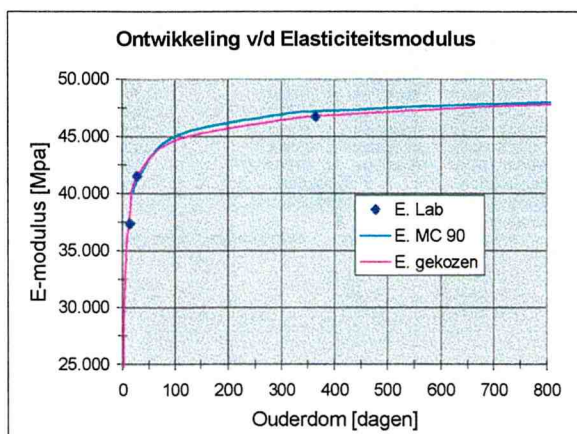
Praktijkwaarden

In hoofdstuk 7 waren de resultaten te zien van het monitoring-onderzoek aan de 2^e Stichtse Brug. In dit onderzoek zijn alle facetten die in het materialen-bestand terug komen gemonitord. Te weten, de ontwikkeling van de E-modulus, de sterkte-ontwikkeling en de ontwikkeling van de krimp en kruip in de tijd. Indien deze resultaten gebruikt worden in het materialen-bestand, mag verwacht worden dat dit leidt tot een vervormingsgedrag dat de realiteit (de gemeten vervorming) goed benadert. Deze waarden kunnen echter niet rechtstreeks in het materialen-bestand worden toegepast, redenen hiertoe zijn:

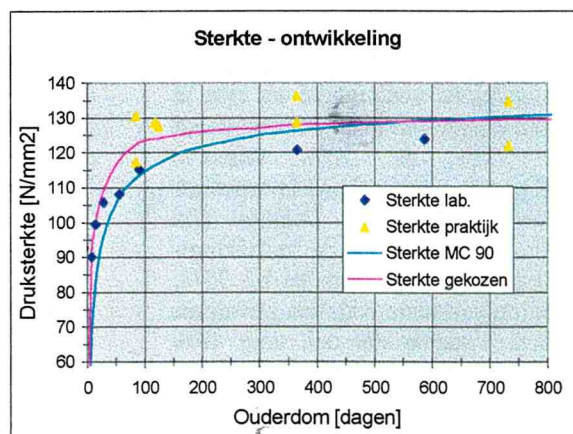
- De sterkte- en elasticiteitsontwikkeling zijn vanzelfsprekend niet onderzocht tot 10.000 dagen. De gevonden waarden dienen geëxtrapoleerd te worden.
- De laboratoriummetingen hebben plaatsgevonden bij een relatieve vochtigheid van 50%, een temperatuur van 20 °C en een fictieve dikte van 50mm. De brug zal onder andere omstandigheden de tijdsafhankelijke vervormingen ondergaan. De laboratorium waarden moeten worden omgerekend naar een relatieve vochtigheid van 75%, een temperatuur van 10°C en een fictieve dikte van 400mm.
- De krimp- en kruipvervormingen dienen omgerekend te worden naar een basiskrimp en -kruipcoëfficiënt. Hiertoe zal eenzelfde curve-fitting / tuning plaats moeten vinden, zoals in Hoofdstuk 5 is gedaan. De waarden voor de basiskrimp en kruipcoëfficiënten van de Model Code 1978 zullen zodanig aangepast moeten worden dat deze overeenstemmen met de krimp- en kruipvervorming, zoals deze gemeten is in het monitoringsrapport.

Als eerste zal er een verloop voor de ontwikkeling van de elasticiteitsmodulus en voor de sterkte worden afgeleid. Dit zal gedaan worden aan de hand van gemeten waarden. Hieronder zijn een tweetal grafieken te zien. De een voor de ontwikkeling van de elasticiteitsmodulus in de tijd, de ander voor de ontwikkeling van de sterkte. Bij de grafiek met de sterkte-ontwikkeling zijn verschillende gemeten waarden te zien. De gemeten waarden uit het laboratorium zijn van proefkubussen die in het lab bewaard zijn. De gemeten waarden uit de praktijk zijn kubussen die in de brug bewaard zijn.

In de grafieken is voor de volledigheid ook het verloop volgens de Model Code 1990 weergegeven.



Figuur 8.4a



Figuur 8.4b

Indien gekeken wordt naar de gemeten waarden uit het laboratorium blijkt dat de Model Code 1990 goed presteert. Dit bleek ook al in paragrafen 7.2.2 en 7.2.3.

Vervolgens moeten de laboratorium waarden van de krimp- en kruipvervormingen omgezet worden van 50% relatieve vochtigheid, 20°C en een fictieve dikte van 50mm, naar een relatieve vochtigheid van 75%, een temperatuur van 10°C en een fictieve dikte van 400mm.

In hoofdstuk 7 waar de resultaten van het monitoring-onderzoek verwerkt zijn, blijkt dat de wijze waarop de krimpvervorming voorspeld wordt volgens de diverse voorschriften in dit betreffende geval twijfelachtig is. Er wordt in de betreffende paragraaf (hoofdstuk 7.2) dan ook geconcludeerd dat het niet raadzaam is, aan het gebruikte vergelijk tussen de voorschriften onderling en ten opzichte van de praktijkmeting, te veel waarde te hechten. Dit zal dan hier ook niet worden gedaan. Vanwege het feit dat uit de andere onderzoeken in Hoofdstuk 7 blijkt dat de Model Code 1990 de krimp relatief gezien het beste voorspelt, én vanwege het feit dat de MC90 ook de elasticiteitsmodulus, de sterkte en de kruip relatief goed voorspelt, wordt hier voor de bepaling van de krimp uitgegaan van de Model Code 1990.

Er wordt uitgegaan van de krimpvervorming volgens het voorschrift, het onderzoek naar de krimpvervorming uit het monitoringsrapport wordt hier dus niet gebruikt. De basiskrimp-factoren zullen dezelfde zijn, zoals ze in Hoofdstuk 5 ook gebruikt zijn.

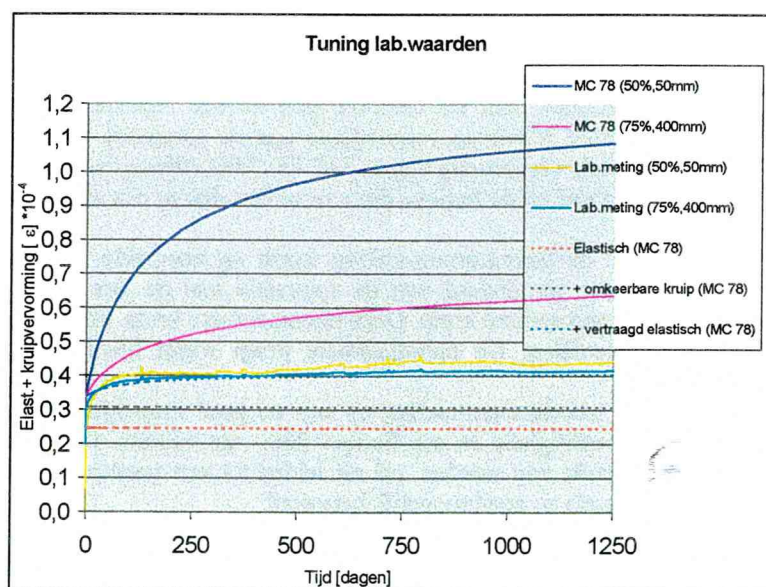
De kruipmetingen uit hoofdstuk 7.2 zullen wel gebruikt worden. Er kan worden verwacht dat wanneer de 2^e Stichtse Brug opnieuw wordt doorgerekend met deze resultaten dat het vervormingsgedrag dichterbij de gemeten waarden zal liggen. Zoals in de inleiding van hoofdstuk 7 vermeld is zijn er ook vervormingsmetingen gedaan aan meetpuntjes die op de moten van de brug zijn aangebracht. Uit deze vervormingen zou het ook mogelijk zijn om kruipresultaten te vinden, dit is hier echter niet gedaan. De metingen aan de meetpuntjes zullen verderop in dit hoofdstuk worden behandeld. Uit deze metingen zullen dan geen kruipfactoren o.i.d. worden gehaald, maar de vervormingen zullen getoetst gaan worden aan berekende vervormingen die zijn uitgevoerd met Bridges.

In Hoofdstuk 7 zijn een drietal kruipvervormingsgrafieken terug te vinden, allen afwijkend in tijdstip van belasten. Het belastingtijdstip varieert van 14 dagen (figuur 7.9), 28 dagen (figuur 7.10) tot 365 dagen (figuur 7.11). Een veel gebruikt tijdstip van belasten is 56 of 70 dagen ouderdom. Dit blijkt ook eerder in dit Hoofdstuk. Er is op dat tijdstip echter geen onderzoek uitgevoerd. Het zou dan voor de hand liggen om uit te gaan van het belastingtijdstip van 28 dagen ouderdom. Dit ligt het dichtst bij een representatief tijdstip in de buurt. Een tijdstip van belasten dat veelal wordt gebruikt en ook juist blijkt te zijn (zie eerder dit hoofdstuk) is 56 dagen. Gebleken is dat er twijfels zijn over de juistheid van de grafiek bij 28 dagen ouderdom, zoals ook vermeld in Hoofdstuk 7. De reden hiertoe is dat bij het aanbrengen van belasting de totale vervorming aan het proefstuk wordt gemeten. Om nu te komen tot de kruipvervorming (inclusief elastische vervorming) moet de krimpvervorming op de totale vervorming in mindering worden gebracht. Er is echter geen krimpvervorming bekend bij ouderdom 28 dagen, wel bij 14 en 365 dagen. Door omstandigheden is in het lab geen onderzoek gepleegd naar de krimpvervorming op dat tijdstip. Om nu toch tot een kruipvervorming te komen, is de krimpvervorming van 14 dagen geëxtrapoleerd en vervolgens toch in mindering gebracht op de totale vervorming bij het proefstuk dat na 28 dagen belast werd. Dit leidt vanzelfsprekend niet tot volledig betrouwbare resultaten.

De resultaten van het belastingtijdstip 28 dagen worden toch gebruikt, vanwege het feit dat 14 dagen ouderdom een te jong beton representeert en 365 dagen ouderdom een te oud beton.

De kruipmetingen uit hoofdstuk 7.2 moeten zoals eerder gezegd, omgezet worden naar een andere fictieve dikte, temperatuur en relatieve vochtigheid. De correctie op temperatuur wordt buiten beschouwing gelaten. Als men deze ook meeneemt, dient men te werken met de fictieve ouderdom, wat tot een zeer ingewikkelde correctie zou leiden.

De correctie van de fictieve dikte en de relatieve vochtigheid, samen met de uitvoering van de tuning zullen worden toegelicht aan de hand van onderstaand figuur.



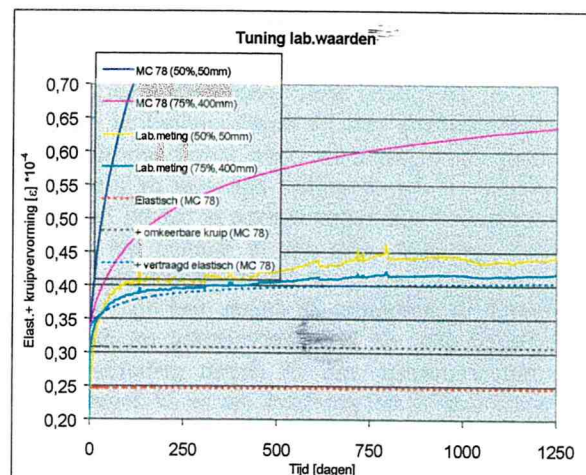
Figuur 8.4c

Ter verduidelijking is de figuur hiernaast nogmaals weergegeven met een andere y-asverdeling.

De laboratorium meting is uitgevoerd bij een relatieve vochtigheid van 50% en een fictieve dikte van 50mm. Bij het curve-fitten / tunen van de kruip-krommen moet als uitgangspunt de Model Code 1978 gebruikt worden. Volgens dit voorschrift rekt Bridges immers. De MC 78 is ook weergegeven voor dezelfde uitgangspunten (50%,50mm).

De lab.meting moet omgezet / gecorrigeerd worden naar een relatieve vochtigheid van 75% en een fictieve dikte van 400 mm. Hiervoor is dan ook de kruipvervorming volgens de MC 78 voor deze waarden weergegeven.

In hoofdstuk 5.3 waar de tuning / curve-fitting is toegelicht, is duidelijk te zien geweest uit welke onderdelen de kruipformulering bestaat. Zie hiervoor figuur 5.5. De onderdelen zijn de elastische vervorming, de omkeerbare kruip, de vertraagd elastische vervorming en de onomkeerbare kruip. Om tot de totale kruipvervorming te komen, worden al deze onderdelen gesommeerd. De eerste drie onderdelen zijn onafhankelijk van de relatieve vochtigheid en de fictieve dikte, de onomkeerbare kruip is hier wel afhankelijk van.



Figuur 8.5d

Om de correctie op de laboratoriumwaarden te bepalen, wordt van de verhoudingen van de onomkeerbare kruip uitgegaan. Het onomkeerbare kruipdeel volgens de Model Code 1978 is de totale kruip (*MC 78 (50%, 50mm)*) c.q. *MC 78 (75%, 400mm)* minus de sommatie van de elastische, vertraagd elastische vervorming en de omkeerbare kruip. Bij deze sommatie hoort in de figuur de waarde 0,404 (bij 1250 dagen).

De afname van de onomkeerbare kruip, indien de relatieve vochtigheid wordt veranderd van 50% naar 75%, en de fictieve dikte van 50 mm naar 400mm, kan via verhoudingen worden bepaald. Dit wordt gedaan door de totale vervorming van de *MC 78 (50%, 50mm)* te verminderen met de sommatie van de drie onderdelen (de waarde 0,404) en te delen door de totale vervorming van de *MC 78 (75%, 400mm)* verminderd met de sommatie. De verandering van relatieve vochtigheid en de fictieve dikte resulteert dan in een afname van de onomkeerbare kruip van 66%.

De correctie op de vervorming van de laboratorium-meting wordt op eenzelfde wijze uitgevoerd. De totale vervorming bij 50% en 50mm wordt verminderd met de sommatie van de drie onderdelen. De resterende vervorming (bijna niets) is dan de onomkeerbare kruip. Deze onomkeerbare kruip wordt verminderd met 66% en weer gesommeerd bij de drie onderdelen. De onomkeerbare kruip wordt hierdoor wel bijna nihil ($4,17 - 4,02 = 0,13$).

Nu is de kruipvervorming voor de laboratorium-meting op een zo goed mogelijke manier omgezet naar een kruipvervorming bij 75% relatieve vochtigheid en een fictieve dikte van 400mm. Indien deze kruipvervorming binnen een Bridges-berekening gebruikt zou worden, zal dit leiden tot een resultaat dat de werkelijkheid (het daadwerkelijke gebruikte betonmengsel) zo goed mogelijk benadert.

Om deze kruipvervorming in Bridges in te voeren, moet eerst weer een basiskruipcoëfficiënt worden bepaald volgens de bekende tuning. De tuning / curve-fitting zal op een dezelfde manier gebeuren als in hoofdstuk 5. Voor de toelichting wordt dan ook naar het betreffende hoofdstuk verwezen.

De basiskruipcoëfficiënt (ϕ_{fi}) van de Model Code 1978 is voor 50% relatieve vochtigheid en een fictieve dikte van 50 mm ongeveer 2,96. Voor een fictieve dikte van 400 mm en een relatieve vochtigheid van 75%, is deze coëfficiënt nog maar 1,64. Na het uitvoeren van de tuning om de MC 78 zo goed mogelijk te laten samenvallen met de gecorrigeerde lab. waarden, blijkt de basiskruipcoëfficiënt slechts 0,2 te zijn. Nihil zoals al gezegd. De coëfficiënt is in het materiaal-bestand hiernaast ingevuld. De waarde 0,2 bij 75% relatieve vochtigheid is geëxtrapoleerd naar 90% en 70% (0,08 en 0,24).

In de figuur zijn ook de ontwikkeling van de E-modulus en de sterkte weergegeven, zoals deze eerder in deze paragraaf bepaald zijn. De basiskrimp-coëfficiënt die is weergegeven, is dezelfde als bij de tuning volgens de Model Code 1990 (MC90*).

Material 1			
B85			
For failure analysis: 3 point diagram			
strain	-0.003	stress	-50.0
	-0.00175		-50.0
	0.0000		0.0
For construction: MODEL 2			
Maturity:	2 days	Modulus :	24430 Strength: 33.9
Maturity:	3 days	Modulus :	27830 44.0
Maturity:	7 days	Modulus :	34000 90.0
Maturity:	14 days	Modulus :	38000 100.0
Maturity:	28 days	Modulus :	41500 109.0
Maturity:	100 days	Modulus :	44600 123.5
Maturity:	300 days	Modulus :	46400 127.0
Maturity:	1000 days	Modulus :	48000 130.0
Maturity:	3000 days	Modulus :	48700 132.0
Maturity:	10000 days	Modulus :	49000 133.0
Dilatancy		: 0.000010	
Dead weight		: 2599.39	
Cement coefficient:		3	
Humidity	Shrinkage	Creep	Coefficient fictive thickness
100	0.00000	0.0	30
90	-0.000046	0.080	5
70	-0.000138	0.240	1.5
40	-0.00000	0.0	1

Figuur 8.5 Materialen-bestand volgens het monitoring rapport

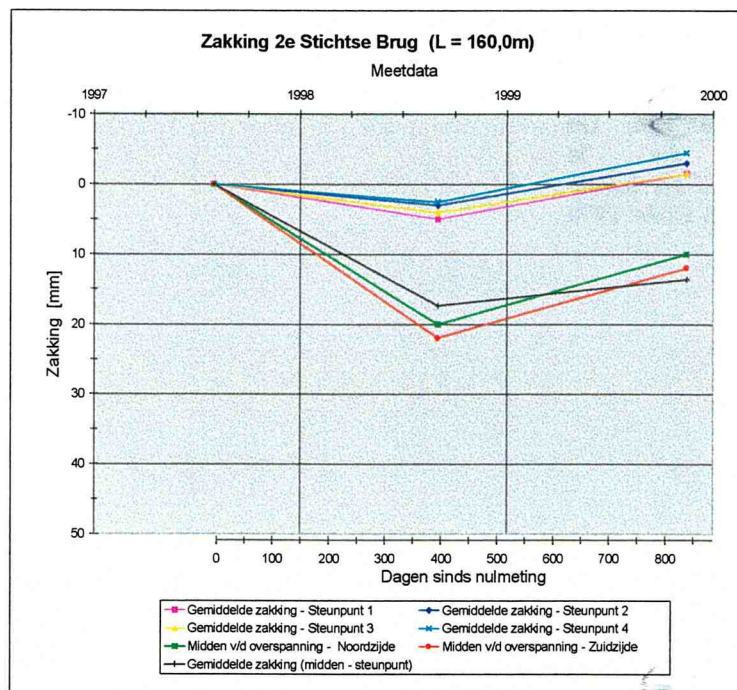
8.3 Zakkingen gedurende de gebruiksfase

Bekend is nu met welke materialen-files gerekend kan worden. In deze paragraaf zullen de vervormingen berekend worden gedurende de gebruiksfase. De gebruiksfase begint hier na het asfalteren van de brug. Op dat tijdstip zijn er buiten aan de brug ook hoogtemetingen verricht.

8.3.1 Gemeten zakkingen

Deze hoogtemetingen zijn in onderstaande figuur weergegeven. Deze figuur is in Bijlage A van de *Voorstudie* ook gebruikt. De zwarte lijn geeft het zogenaamde netto-zakkingsverloop weer. Deze zakkingslijn komt uit de volgende berekeningswijze voort: als eerste worden de steunpuntszakkingen gemiddeld, zo ook de zakkingen in het midden van de hoofdoverspanning. Vervolgens wordt de gemiddelde zakking van het midden van de overspanning verminderd met de gemiddelde zakking van de steunpunten.

Dit is een gerechtvaardigde methode, vanwege het feit dat de steunpuntszakkingen zo weinig van elkaar verschillen. Bij grotere verschillen bij de steunpuntszakkingen zouden effecten als buiging en het 'kwispelen' van de constructie een relatief grote invloed kunnen hebben op de zakking in het midden van de hoofdoverspanning.

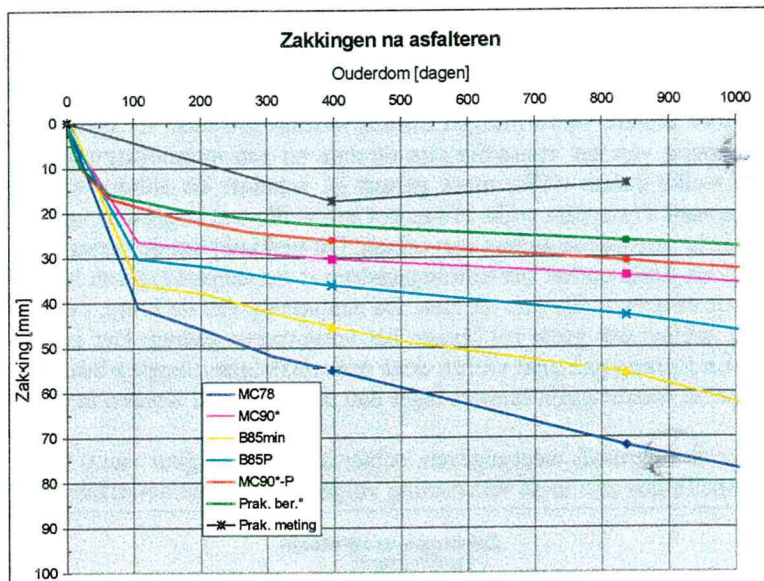


Figuur 8.6

In figuur 7.8 leek het erop dat de brug na ongeveer 450 dagen na asfalteren ging zwellen. Een dergelijk iets lijkt ook hier op te treden op een zelfde tijdstip. Dit verschijnsel zal in hoofdstuk 8.6 nader beschouwd worden. De datum van de nulmeting, het eerste meetpunt in bovenstaande figuur is 31 september 1997. De brug is geasfalteerd op 15 september 1997.

8.3.2 Berekende zakkings

In de grafieken hieronder zijn de zakkingslijnen in het midden van de hoofdoverspanning terug te vinden. Deze zakkingslijnen zijn berekend volgens Bridges, met de materialen-files uit de vorige paragraaf.



Figuur 8.7 Vergelijk gemeten en berekende zakkings 2^e Stichtse Brug na asfalteren

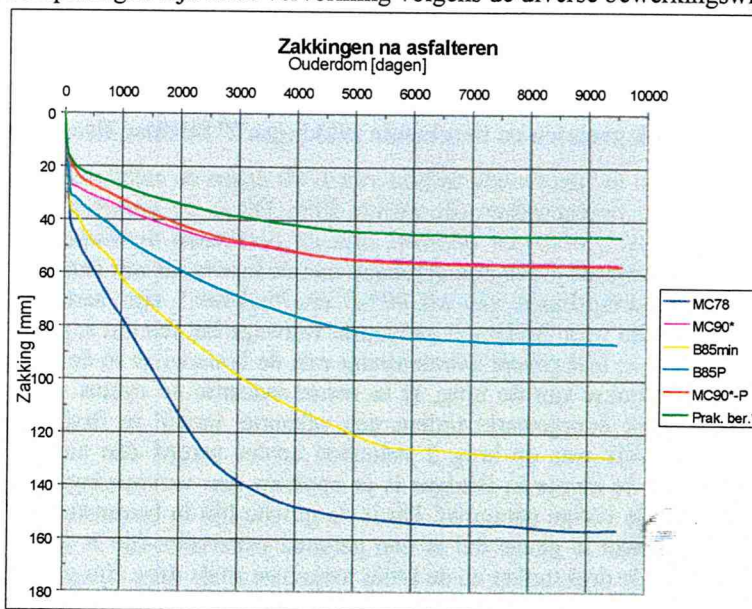
Hierboven zijn de zakkingslijnen te zien tot een tijdstip van 1000 dagen na asfalteren. In deze grafiek is ook de netto-zakkingslijn uit figuur 8.6 overgenomen (de zwarte lijn). Dit is de gemeten zakking van de brug. De zakkingslijnen van MC78, MC90*, B85P en B85Min, zijn de berekende vervormingen met gebruik van de materialen-files uit de vorige paragraaf. Deze zijn berekend met de invoerfile van Bridges, waarmee de ontwerp-berekening is gemaakt. De zakkingslijnen van MC90*-P en Prak.ber.* zijn berekend met een aangepaste invoerfile. Het originele invoerfile voor Bridges is aangepast vanwege het feit dat is gebleken dat de bouwwijze zoals die in Bridges opgegeven is, niet geheel overeenstemt met de bouwwijze in de praktijk. Wat afwijkt is de bouwtijd. In het begin van de bouw van de brug, is in eerste instantie de cyclus van 1 moot per week niet gehaald. Verder is in de praktijk doorgewerkt tijdens een vakantie, terwijl in Bridges wel met een vakantie rekening is gehouden. Uiteindelijk was de brug 2 maanden eerder gereed dan aangenomen in de ontwerp-berekening. Na aanpassing van de invoer in Bridges is er opnieuw een vervormingsberekening gestart, samen met het materialen-bestand uit de vorige paragraaf. Dit is de groene lijn in bovenstaande grafiek (Prak. ber.*). Het sterretje is toegevoegd om aan te geven dat er een getuned materialen-file is gebruikt. In dit materialen-bestand zijn dus de E-modulus, de druksterkte en de kruip toegepast zoals deze zijn gemeten aan het beton zoals dit in de 2^e Stichtse Brug gebruikt is. Verder is ook nog de MC90*-P weergegeven. Dit is de vervormingslijn volgens de getuned Model Code 1990 samen met het invoerbestand voor Bridges wat is aangepast aan de data van de gebeurtenissen zoals de bouw van de brug in de praktijk is geschied.

Er vallen meteen een aantal zaken op:

- Zoals verwacht presteert de Model Code 1978 slecht. Uit eerdere hoofdstukken is al gebleken dat de Model Code 1978 de krimp- en kruipvervormingen van hogesterktebeton ver overschat.
- De toepassing van de materialen-files volgens de MC90*, komt redelijk goed-overeen met de gemeten vervorming. Vergelijk daarvoor de paarse en de zwarte lijn.
- De ontwerp-berekening van Rijkswaterstaat met de B85P en B85Min variant, ligt tussen de MC78 en de MC90* in. Dit was volgens hoofdstuk 5 ook te verwachten. In dit hoofdstuk bleek namelijk al dat indien de basiskrimp- en -kruipcoëfficiënt volgens de Model Code 1990 toegepast wordt in de formulering van de Model Code 1978 dat dit leidt tot resultaten die tussen de MC78 en MC90 in liggen. Dit blijkt ook hier zo te zijn.

- De groene lijn in de figuur representeert de vervormingsberekening met als uitgangspunt de aangepaste data (het 2 maanden eerder sluiten van de brug). En het aangepaste materialen-bestand zoals dat in Figuur 8.5 is weergegeven. Hierin zijn de aangepaste E-modulus, de aangepaste sterkte en de getunede kruip aanwezig, zoals deze bepaald zijn uit het monitoring rapport en de laboratoriumproeven. De vervormingslijn presteert nog iets beter dan de MC90*. Iets wat logischerwijs te verwachten is, immers de kruip is minder.
- De rode lijn geeft de vervormingen weer volgens de Model Code 90* samen met het aangepaste invoerfile, waarin de data zijn aangepast. De brug is in deze berekening 2 maanden eerder geasfalteerd.
- Indien dan ook de rode lijn en de paarse lijn vergeleken worden, blijkt er weinig tot geen verschil in zakkingen op te treden indien de data in het invoerfile worden aangepast. Er zou verwacht worden dat de vervormingslijn volgens MC90*-P meer zal vervormen dan de MC90*. De beton wordt immers op jongere leeftijd belast, waardoor grotere vervormingen zouden moeten optreden. Er spelen echter ook andere zaken een rol. Bij de aanpassing van het invoerfile zijn de data uit een monitoringsrapport gehaald. Hierin staat precies vermeld, op welke datum welke moot gestort is, wanneer de uitbouwagens zijn weggehaald en wanneer is voorgespannen. Deze data wijkt af van het invoerfile wat is gebuikt voor het ontwerp. Door deze aanpassing zal de gehele constructie anders vervormen. Dit verklaart dat de verschillen zo klein zijn.
- Wat een grotere invloed heeft op het vervormingsgedrag is de aanpassing van het materialen-bestand. Het verschil tussen de rode en groene lijn laat dit zien. De aanpassing van de kruip, de elasticiteitsmodulus en de sterkte-ontwikkeling hebben een grote rol binnen het vervormingsgedrag. Het is dan ook aan te raden dat indien een ontwerp-berekening gemaakt wordt, deze materiaaleigenschappen bekend zijn. De in de praktijk en laboratorium gemeten waarden zijn immers lager dan die voorspeld worden in de voorschriften.

Hieronder is de vorige figuur nogmaals weergegeven, echter loopt deze figuur van 0 tot 10.000 dagen. Hierin is goed te zien wat de voorspellingen zijn in de vervorming volgens de diverse bewerkingswijzen.



Figuur 8.8 Vergelijk berekende zakkingen 2^e Stichtse Brug na asfalteren

In Bijlage C zijn de Figuren 8.7 en 8.8 nogmaals weergegeven. Deze figuren zijn op grotere schaal nogmaals toegevoegd voor de geïnteresseerden. Indien meerdere hoogtemetingen bekend worden in de toekomst, kunnen deze metingen in de grafieken worden getekend. Hierdoor kunt u als lezer het vervormingsgedrag in de gaten houden, en bekijken of de hier gedane voorspellingen ten aanzien van het vervormingsgedrag in de toekomst juist zijn. Aan de hand van de hier gedane berekeningen wordt voorspeld dat de brug in het midden van de hoofdo overspanning 4 á 4,5 cm zal doorbuigen.

8.4 Zakkingen gedurende de bouwfase

Tijdens de bouw van de brug zijn er natuurlijk ook vervormingen opgetreden. Het uitbouwproces, waarbij steeds een moot (en dus een stukje belasting) aan wordt gebracht op een steeds langer wordende uitkragende ligger gaat natuurlijk niet zonder vervormingen. Al deze vervormingen zijn prima in kaart gebracht. Dit moet ook wel, want men moet in het midden van de brug wel goed uitkomen. Aangezien de brug in twee delen wordt gebouwd is dit van groot belang. Het is duidelijk geworden dat als de ene kraagarm af is men pas met de tweede kraagarm begint. De eerste kraagarm wordt boven het water tot een bepaalde hoogte uitgebouwd. De tweede kraagarm wil men op dezelfde hoogte uit laten komen, zodat de sluitmoot, zonder al te veel correctiewerk, er tussen kan worden gebouwd.

Tijdens de bouw van de tweede kraagarm zal de eerste kraagarm verder vervormen, het tijdsafhankelijke vervormingsgedrag. Nu is het uitbouwen een secuur werk en men zal daarom willen weten hoeveel deze vervorming bedraagt.

Gedurende de bouw houdt men dergelijke vervormingen goed in de gaten en deze worden in een zogenaamde 'kerstboom' ingevuld. In deze kerstboom, die zijn naam te danken heeft aan zijn vorm (zie hieronder), worden de hoogtemetingen van elke moot ingevuld. Deze metingen vinden elke keer plaats als er een nieuwe moot ontlast wordt, zodat het vervormingsgedrag van de kraagarm goed te volgen is. Dat als er een nieuwe moot wordt ingemeten, dan ook de voorgaande moten worden gemeten, is duidelijk in het onderstaande overzicht terug te vinden.

datum	dagen na ontkisten hamerstuk	event	hamerstuk	Zoost-1	Zoost-2	Zoost-3	Zoost-4	Zoost-5	Zoost-6	Zoost-7	Zoost-8	Zoost-9	Zoost-10	Zoost-11	Zoost-12	Zoost-13	Zoost-14	Zoost-15
		Afstand vanaf hart hamerstuk	7,5	11,5	15,5	19,5	23,5	27,5	32,5	37,5	42,5	47,5	52,5	57,5	62,5	67,5	72,5	77,5
27-05-96	0	hamerstuk ontkisten	44															
14-07-96	48	moot 1 ontkist	56	96														
25-07-96	59	moot 2 ontkist	56	97	143													
08-08-96	73	moot 3 ontkist	56	98	144	162												
17-08-96	82	moot 4 ontkist	55	98	144	161	207											
25-08-96	90	moot 5 ontkist	57	99	146	164	210	245										
01-09-96	97	moot 6 ontkist	54	96	143	162	205	239	294									
08-09-96	104	moot 7 ontkist	54	97	143	163	207	242	297	346								
15-09-96	111	moot 8 ontkist	54	95	141	160	203	238	293	340	386							
22-09-96	118	moot 9 ontkist	53	93	138	156	198	232	285	330	374	416						
29-09-96	125	moot 10 ontkist	55	96	142	161	204	239	294	340	386	428	468					
06-10-96	132	moot 11 ontkist	55	94	140	158	200	232	286	331	375	416	452	512				
13-10-96	139	moot 12 ontkist	54	95	140	156	198	230	281	325	367	407	449	495	517			
20-10-96	146	moot 13 ontkist	54	94	140	156	197	228	278	318	359	395	427	480	501	532		
27-10-96	153	moot 14 ontkist	54	94	139	154	194	222	269	306	342	371	397	443	456	475	503	
03-11-96	160	stort sluitmoot eindveld	55	95	140	154	197	226	273	311	346	377	403	451	465	484	511	
07-11-96	164	moot 15 ontkisten / continu. voersp. eindveld	50	89	131	144	181	207	248	280	309	332	349	387	391	399	414	416
03-12-96	190	uitbouw wagens weg	53	90	135	150	189	215	259	295	327	354	377		429	444	467	475
27-04-97	335	vlak voor sluiten	54	92	134	147	185	212	255	290	320	345	366		415	429	450	456

Figuur 8.9 ½ Kerstboom 2° Stichtse Brug (gemeten)

Hierboven is een halve kerstboom weergegeven. Indien het westelijk deel van de kraagarm hierbij ook wordt gegeven, wordt duidelijk waarom een dergelijk overzicht een kerstboom wordt genoemd. Er is te zien dat het hamerstuk bij het ontkisten van de 1° moot gekanteld is. Dit komt omdat de 1° moot van het westelijk deel van de kraagarm eerst is gestort, en pas een week later de eerste moot van het oostelijk deel. Hierdoor is het hamerstuk aan de oostzijde 12 mm gekanteld (omhoog aan oostelijke zijde). Dit is het bovenstaande figuur in de eerste en tweede regel terug te vinden. Het hamerstuk kantelt van 44mm naar 56mm.

Een aantal opmerkingen ten aanzien van het gebruik van deze kerstboom zijn:

- Te zien is dat het hamerstuk continue een paar millimeter kantelt. Dit is zeer begrijpelijk als men kijkt naar het systeem van de brug, een uitbouwbrug is tijdens de bouw namelijk een evenwichtsconstructie. Indien er aan de ene zijde wat meer belasting wordt aangebracht is dit duidelijk waarneembaar aan de andere zijde.
- Vooral het voorspannen van het eindveld heeft een grote invloed op het kanteffect van het hamerstuk en daarmee de verdere kraagarm. De kraagarm alleen al kantelt van 55 mm naar 50 mm. Dit kantelen en daarmee het kwispeleffect moet worden verdisconteert.
- Het kwispeleffect heeft grote gevolgen voor het corrigeren van het kantelen. Immers kijkend naar de lengten van de kraagarm en het hamerstuk, respectievelijk 77,5 en 7,5 meter, zit hier ruim een factor 10 in. Dit wil zeggen dat als het hamerstuk 1 mm kantelt, dit merkbaar is aan het uiteinde van de kraagarm (bij moot 15) door een kanteling van 10 mm.

- Indien wordt gekeken wat de invloed van afleesfouten is, blijken deze nogal een grote invloed te hebben. Het is goed denkbaar dat er bij het waterpassen afleesfouten in de orde van 1 mm gemaakt worden. Dit lijkt zeer weinig. Maar als weer naar het kwispelen gekeken wordt blijkt deze invloed van groot belang.

Om een beter overzicht te krijgen is de kerstboom opnieuw hieronder weergegeven. In de onderstaande kerstboom zijn eventuele afleesfouten of -nauwkeurigheden gecorrigeerd. Dit is vooral bij het hamerstuk en de eerste moot gedaan, vanwege het feit dat daar goed te zien is, waar er leesfouten zijn gemaakt in de orde van 1 mm. Verder zijn ook de ontbrekende punten ingevuld.

datum	dagen na ontkisten hamerstuk	event	hamerstuk	Zoost-1	Zoost-2	Zoost-3	Zoost-4	Zoost-5	Zoost-6	Zoost-7	Zoost-8	Zoost-9	Zoost-10	Zoost-11	Zoost-12	Zoost-13	Zoost-14	Zoost-15
		Afstand vanaf hart hamerstuk	7,5	11,5	15,5	19,5	23,5	27,5	32,5	37,5	42,5	47,5	52,5	57,5	62,5	67,5	72,5	77,5
27-05-96	0	hamerstuk ontkisten	44															
14-07-96	48	moot 1 ontkist	56	96														
25-07-96	59	moot 2 ontkist	56	97	143													
08-08-96	73	moot 3 ontkist	56	98	144	162												
17-08-96	82	moot 4 ontkist	56	98	144	161	207											
25-08-96	90	moot 5 ontkist	57	99	146	164	210	245										
01-09-96	97	moot 6 ontkist	54	96	143	162	205	239	294									
08-09-96	104	moot 7 ontkist	54	97	143	163	207	242	297	346								
15-09-96	111	moot 8 ontkist	53	95	141	160	203	238	293	340	386							
22-09-96	118	moot 9 ontkist	52	93	138	156	198	232	285	330	374	416						
29-09-96	125	moot 10 ontkist	55	96	142	161	204	239	294	340	386	428	468					
06-10-96	132	moot 11 ontkist	54	94	140	158	200	232	286	331	375	416	452	512				
13-10-96	139	moot 12 ontkist	54	94	140	156	198	230	281	325	367	407	440	495	517			
20-10-96	146	moot 13 ontkist	54	94	140	156	197	228	278	318	359	395	427	480	501	532		
27-10-96	153	moot 14 ontkist	54	94	139	154	194	222	269	306	342	371	397	443	456	475	503	
03-11-96	160	stort sluitmoot eindveld	55	95	140	154	197	226	273	311	346	377	403	451	465	484	511	
07-11-96	164	moot 15 ontkisten / continu. voorsp. eindveld	51	89	131	144	181	207	248	280	309	332	349	387	391	399	414	416
03-12-96	190	uitbouw wagens weg	52	91	135	150	189	215	259	295	327	354	377	422	429	444	467	475
27-04-97	335	vlak voor sluiten	52	91	134	147	185	212	255	290	320	345	366	410	415	429	450	456

Figuur 8.10 Gecorrigeerde kerstboom (t.a.v. gemeten waarden)

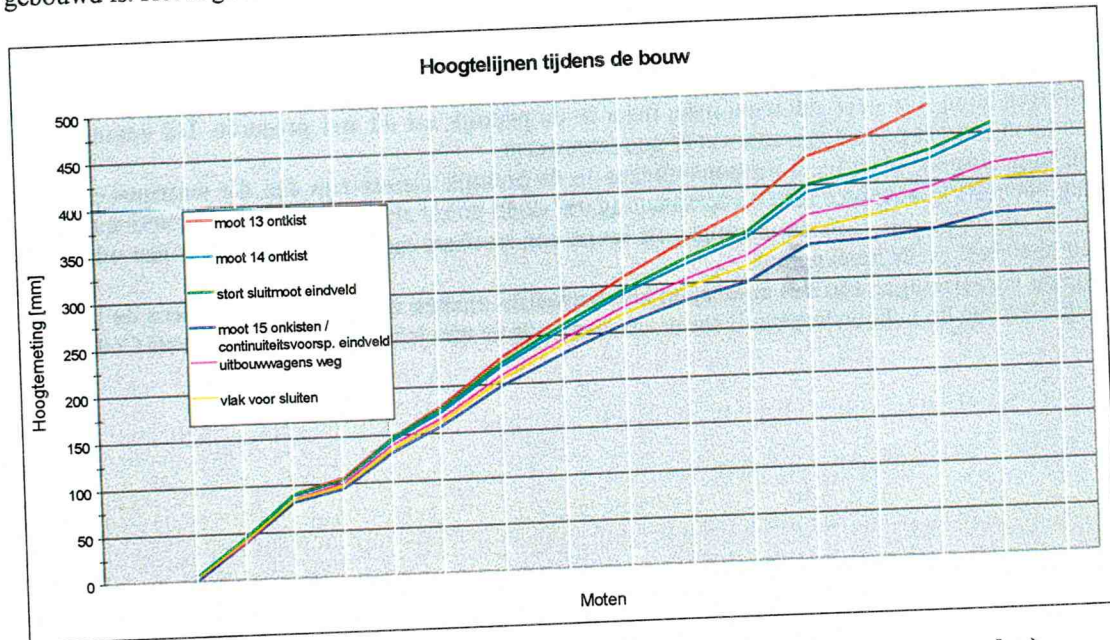
Hieronder is nogmaals een kerstboom weergegeven, echter is nu de kanteling van het hamerstuk verdisconteerd. Hierbij wordt er meteen van uitgegaan dat de vervormingen van het hamerstuk na het storten van de eerste moot niet meetbaar zijn, vanwege het feit dat dit een zeer massieve constructie is. In de onderstaande figuur zijn ook de beginhoogten van de diverse moten op nul gezet om een beter overzicht te krijgen.

datum	dagen na ontkisten hamerstuk	event	hamerstuk	Zoost-1	Zoost-2	Zoost-3	Zoost-4	Zoost-5	Zoost-6	Zoost-7	Zoost-8	Zoost-9	Zoost-10	Zoost-11	Zoost-12	Zoost-13	Zoost-14	Zoost-15
		Afstand vanaf hart hamerstuk	7,5	11,5	15,5	19,5	23,5	27,5	32,5	37,5	42,5	47,5	52,5	57,5	62,5	67,5	72,5	77,5
27-05-96	0	hamerstuk ontkisten	0															
14-07-96	48	moot 1 ontkist	0	0														
25-07-96	59	moot 2 ontkist	0	1,0	0													
08-08-96	73	moot 3 ontkist	0	2,0	1,0	0												
17-08-96	82	moot 4 ontkist	0	2,0	1,0	-1,0	0											
25-08-96	90	moot 5 ontkist	0	1,5	0,9	-0,6	-0,1	0										
01-09-96	97	moot 6 ontkist	0	3,1	4,1	5,2	4,3	5,0	0									
08-09-96	104	moot 7 ontkist	0	4,1	4,1	6,2	6,3	8,0	3,0	0								
15-09-96	111	moot 8 ontkist	0	3,6	4,2	5,8	5,4	7,7	3,3	-1,0	0							
22-09-96	118	moot 9 ontkist	0	3,1	3,3	4,4	3,5	5,3	-0,3	-6,0	-6,3	0						
29-09-96	125	moot 10 ontkist	0	1,5	1,1	1,6	0,1	1,3	-4,3	-11,0	-11,3	-7,0	0					
06-10-96	132	moot 11 ontkist	0	1,1	1,1	1,2	-0,7	-2,0	-8,0	-15,0	-16,7	-12,7	-9,0	0				
13-10-96	139	moot 12 ontkist	0	1,1	1,1	-0,8	-2,7	-4,0	-13,0	-21,0	-24,7	-21,7	-7,0	-17,0	0			
20-10-96	146	moot 13 ontkist	0	1,1	1,1	-0,8	-3,7	-6,0	-16,0	-28,0	-32,7	-33,7	-34,0	-32,0	-16,0	0		
27-10-96	153	moot 14 ontkist	0	1,1	0,1	-2,8	-6,7	-12,0	-25,0	-40,0	-49,7	-57,7	-64,0	-69,0	-61,0	-57,0	0	
03-11-96	160	stort sluitmoot eindveld	0	0,5	-0,9	-5,4	-6,9	-11,7	-25,3	-40,0	-51,3	-58,0	-65,0	-68,7	-60,3	-57,0	-1,7	
07-11-96	164	moot 15 ontkisten / continu. voorsp. eindveld	0	0,7	-1,7	-5,0	-10,3	-16,0	-33,0	-51,0	-65,7	-77,7	-91,0	-102,0	-101,0	-106,0	-60,0	0
03-12-96	190	uitbouw wagens weg	0	1,1	0,3	-1,6	-5,5	-11,7	-26,3	-41,0	-53,3	-62,0	-70,0	-74,7	-71,3	-70,0	-16,7	48,7
27-04-97	335	vlak voor sluiten	0	1,1	-0,7	-4,6	-9,5	-14,7	-30,3	-46,0	-60,3	-71,0	-81,0	-86,7	-85,3	-33,7	-29,7	

Figuur 8.11 Kerstboom verdisconteerd op kwispelen (gemeten waarden)

In principe kan nu nogmaals bekeken worden, of er nog afwijkingen te vinden zijn in de weergegeven hoogten, echter is dit weinig zinvol. De kerstboom zal in dit afstudeeronderzoek alleen gebruikt worden om te onderzoeken in hoeverre de eerste kraagarm heeft vervormd, terwijl de tweede gebouwd werd. Dus de laatste twee regels in de kerstboom. Deze vervorming is ongeveer 19 mm. Aan de waarden achter de komma moet niet te veel waarde gehecht worden, deze komen voort uit het verdisconteren van het kwispeleffect. Wat opvalt is dat het eerste aantal moten zeer weinig tot niets vervormen. Enkele millimeters mogen wel worden beschouwd als zeer weinig, mede door het feit van fouten door aflezen en kwispelen.

In de onderstaande grafiek zijn de waarden van de kerstboom uit figuur 8.10 weergegeven met vermindering van 44 mm. Uit deze figuur is het gedrag van de brug goed af te lezen, en ook het alignement is goed te zien. Het kwispeleffect is hieruit niet verdisconteerd, omdat de waarden in de grafiek ook de hoogtematen zijn, zoals de brug gebouwd is. Het is goed te zien hoe de brug reageert bij het plaatsen en verwijderen van belastingen.



Figuur 8.12 Hoogtelijnen tijdens de bouw – 2° Stichtse Brug (gemeten waarden)

Met Bridges kunnen dergelijke vervormingen ook berekend worden. Hiertoe is het aangepaste invoerfile gebruikt waarbij de data van de gebeurtenissen zijn aangepast, en is ook het aangepaste materialen-file gebruikt. Er kan nu een zelfde soort overzicht gemaakt worden als in Figuur 8.11, waarbij het kwispelen / vervormen van het hamerstuk wordt verdisconteerd en gemakshalve de hoogten van elke moot op nul worden gezet. Door dit te doen komt men tot de volgende (halve) kerstboom:

dagen na ontkisten hamerstuk	event	hamerstuk	7,5	11,5	15,5	19,5	23,5	27,5	32,5	37,5	42,5	47,5	52,5	57,5	62,5	67,5	72,5	77,5
0	afstand vanaf hart hamerstuk	0																
48	hamerstuk ontkisten	0	0															
59	moot 1 ontkist	0	0	0														
73	moot 2 ontkist	0	0,0	0														
82	moot 3 ontkist	0	0,2	0,4	0													
90	moot 4 ontkist	0	0,2	0,4	0,1	0												
97	moot 5 ontkist	0	0,2	0,5	0,2	0,4	0											
104	moot 6 ontkist	0	0,2	0,6	0,4	0,6	0,4	0										
111	moot 7 ontkist	0	0,0	0,0	-0,5	-1,0	-1,8	-3,0	0									
118	moot 8 ontkist	0	0,0	-0,2	-1,0	-1,6	-2,9	-4,6	-2,1	0								
125	moot 9 ontkist	0	-0,2	-0,8	-2,0	-3,2	-5,2	-8,0	-6,6	-5,6	0							
132	moot 10 ontkist	0	-0,4	-1,1	-2,5	-4,1	-6,6	-10,0	-9,5	-9,3	-4,1	0						
139	moot 11 ontkist	0	-0,4	-1,3	-3,2	-5,3	-8,4	-12,9	-13,7	-14,8	-11,1	-8,2	0					
146	moot 12 ontkist	0	-0,6	-1,9	-4,3	-7,2	-11,3	-17,4	-20,2	-23,7	-22,7	-22,4	-16,7	0				
153	moot 13 ontkist	0	-0,8	-2,3	-5,3	-9,0	-14,3	-22,3	-27,6	-34,3	-36,9	-40,7	-39,2	-26,4	0			
160	moot 14 ontkist	0	-1,2	-3,6	-7,8	-13,1	-20,5	-32,0	-41,9	-54,4	-63,9	-75,8	-83,3	-80,5	-64,3	0		
164	stort sluitmoot eindveld	0	-1,2	-3,6	-7,8	-13,2	-20,7	-32,5	-42,7	-55,6	-65,6	-78,1	-86,3	-84,0	-68,4	-4,6		
190	moot 15 ontkisten / continu. voersp. eindveld	0	-1,6	-4,8	-10,2	-17,2	-27,1	-42,6	-57,6	-76,4	-93,7	-114,7	-140,9	-136,5	-84,3	0		
335	uitbouwwegens weg	0	-1,5	-4,5	-9,6	-16,3	-25,5	-40,2	-54,1	-71,5	-87,0	-105,9	-121,2	-126,5	-118,6	-62,5	69,9	
	vlak voor sluiten	0	-1,6	-4,6	-9,8	-16,6	-26,0	-41,0	-55,3	-73,1	-89,0	-108,3	-123,9	-129,4	-121,5	-65,4	67,1	

Figuur 8.13 De kerstboom volgens Bridges

De berekende zakking van de kraagarm gedurende bijna 5 maanden is slechts 3 mm. Terwijl buiten ongeveer 2 cm gemeten is. Ook de andere meetpunten komen niet overeen met de gemeten waarden die zijn weergegeven in figuur 8.11.

Dit is te verklaren door de wijze waarop Bridges rekent en de ongeschikte tuning. Het is bekend is dat Bridges rekent volgens de formuleringen van de Model Code 1978. Hierin wordt de kruip opgesplitst in een aantal onderdelen. De tuning die gedaan is om toch met de Model Code 1990 te rekenen binnen Bridges, is gemaakt met als uitgangspunt dat er een constante belasting aanwezig is (en blijft). De berekening die hier is uitgevoerd is een berekening tijdens de bouwphase van de brug. Tijdens deze fase, wordt om de week belasting aangebracht (storten moot en voorspannen) en wordt er belasting verwijderd (weghalen uitbouwwagen, voorspannen), hierdoor is de toegepaste tuning in principe niet geldig. Het is namelijk niet mogelijk een tuning te maken die ook de Model Code 1990 simuleert gedurende belastingwisselingen. Hiervoor wijken de Model Code 1978 en de Model Code 1990 teveel af. Om tijdens de bouwphase een goed vergelijk te maken tussen de gemeten en berekende waarden zal er toch gerekend moeten worden met een programma wat wel kan rekenen volgens de Model Code 1990.

Ook kan nog naar andere oorzaken gezocht worden. Bijvoorbeeld het verschil in dikte van de boven- en ondervloer. De bovenvloer is dunner en dunnere constructies krimpen meer. Hierdoor zal de kraagarm omhoog willen. Bridges houdt hier geen rekening mee, maar in de praktijk zal dit wel gebeuren. Dit uitgangspunt geeft resultaten die juist tegengesteld zijn aan wat er gemeten wordt.

Een ander uitgangspunt is dat de voorspanverliezen in de praktijk kleiner zijn dan die waarmee de (ontwerp)-berekening gemaakt is. Hierdoor zal de voorspanning per saldo groter zijn. Door een hogere voorspanning zal de kraagarm op willen buigen. Ook dit uitgangspunt levert een resultaat op dat tegengesteld is aan wat er gemeten wordt (ten opzichte van de berekening).

De berekende vervormingen zijn dus onjuist, en het nauwelijks zakken van de kraagarm tijdens de lange periode na het weghalen van de uitbouwwagens is toe te schrijven aan de niet juist te modelleren Model Code 1990.