

Memo

www.tno.nlgerrie.dieteren@tno.nl
+31611700543

Aan GPO Rijkswaterstaat
Onderwerp Aanvullingen resultaatsbeschrijving Kokerbruggen
voor krimp en kruip effecten

Datum
19 april 2024
Onze referentie
TNO 2024 M10721

1. Inleiding

In dit memo worden t.o.v. de NEN-EN 1992-1-1 afwijkende modellen gegeven voor de modellering van het krimp- en kruipgedrag van beton in kokerbruggen. Aanleiding hiervoor is een uitgebreide studie op basis van langjarige vervormingsmetingen aan (uitbouw)bruggen wereldwijd, waaruit is gebleken dat de modellen zoals gegeven in NEN-EN1992-1-1 de optredende vervormingen significant onderschatten, met name op de lange termijn. Op basis daarvan is door Bazant en Wan-Wendner [1] het zogenaamde RILEM B4 Model afgeleid. Uit een recente studie van Andrade-Borges [2] blijkt dat dit model veel beter in staat is om de langjarige vervormingen in een kokerbrug te beschrijven. Daarmee kan dus ook een betere inschatting gemaakt worden van de tijdsafhankelijke voorspanverliezen over meerdere decennia. In dit memo wordt het RILEM B4 model nader toegelicht en is – waar nodig/mogelijk – voor de toepassing op kokerbruggen invulling gegeven aan de benodigde input parameters. Het memo dient als aanvulling op de tekst van de Resultaatsbeschrijving Verificatieberekeningen Betonnen Kokerbruggen [3]

2. Aanvullingen op Resultaatsbeschrijving Verificatieberekeningen Betonnen Kokerbruggen.

2.1. Modellering algemeen

Voor gefaseerd gebouwde betonnen kokerbruggen die zijn uitgevoerd als uitbouwbrug, plakbrug en/of schuifbrug (incremental launching / Taktschiebeverfahren) moet voor het bepalen van het langjarig gedrag (deformaties, voorspanverliezen en andere door tijdsafhankelijke effecten beïnvloede parameters) worden uitgegaan van:

- een modellering met schaalementen in een eindige-elementenmodel met een visco-elastisch materiaalgedrag voor krimp en kruip effecten;
- een gefaseerde tijdsafhankelijke analyse, waarbij de bouwfaserings expliciet wordt meegenomen.

Voor de modellering mag in plaats van schaalementen ook gebruik gemaakt worden van volume elementen. Indien niet van invloed op de resultaten mag de modellering gebruik gemaakt worden van aanwezige symmetrie in de constructie.

Voor het aantal tijdstappen en de stapgrootte moet minimaal worden uitgegaan van alle tijdstippen waarop de belastingssituatie veranderd, anders dan door veranderlijke belasting, met een maximum tijdstap van 1 jaar. Tijdens de bouwphase moet hierbij minimaal worden uitgegaan van de belangrijkste veranderingen in de constructie en randvoorwaarden welke van invloed kunnen zijn op het langjarig vervormingsgedrag.

In het geval van een uitbouwbrug dient bij de definiëring van de tijdstappen in het algemeen rekening te worden gehouden met de:

- belastingsstappen tijdens het bouwen van de moten, waarbij voor de aangehouden (week)cyclus moet rekening gehouden worden met belastingsverandering door het:
 - o aanbrengen van de uitbouwbekisting;
 - o storten beton van de uitbouwmoot;
 - o aanbrengen van de voorspanning.
- belastingsstappen bij aanwezigheid van het hele brugdek:
 - o aanbrengen van de sluitmoot;
 - o het verwijderen van de tijdelijke ondersteuning (of elke andere wijziging van de randvoorwaarden in het model);
 - o aanbrengen asfalt, schampkanten, etc..

Voor het van de tijdsafhankelijke verliezen op de voorspanbelasting kan in het eindige-elementenmodel uitgegaan worden van de voorspanning resulterend na optreden van de relaxatieverliezen. De voorspanverliezen door krimp en kruip dienen door het model te worden beschreven. Hiervoor dient de voorspanning aanvankelijk zonder aanhechting te worden gemodelleerd, en na het grouten van de voorspanbuizen met aanhechting. In het verleden werd bij uitbouwbruggen het grouten vaak om de paar weken (bijvoorbeeld 3 bij de in [2] beschouwde case) een keer uitgevoerd. Een dergelijk tijdsinterval kan in de fasering gebruikt worden om voor alle op dat moment actieve voorspankabels zonder aanhechting de switch naar een materiaalmodel met aanhechting te maken.

Toelichting op de begrenzing van de tijdstapgrootte:

Na het afronden van de bouwfase zullen de tijdstappen waarin permanente belasting wijzigt relatief groot worden, maar moet toch elk jaar de effecten van krimp- en kruip nagegaan worden om het vervormingsgedrag van de brug in de tijd goed te voorspellen. Daar de krimp en kruip effecten kleiner worden al naar gelang de tijdsduur waarop de belasting aanwezig is, kan bij langdurige belasting mogelijk volstaan worden met tijdstappen > 1 jaar. Hiertoe zal echter eerst ervaring opgedaan moeten worden bij meerdere uitbouwbruggen. Vooral nog is de maximale tijdstap daarom op 1 jaar gesteld.

2.2. Materiaal modellen krimp en kruip in beton

2.2.1. Inleiding

Voor de tijdsafhankelijke analyse moeten de krimp en kruip effecten worden bepaald zoals onderstaand weergegeven.

Voor de bepaling van de tijdsafhankelijke effecten moet in plaats van art 3.1.4 en/of bijlage B van NEN-EN1992-1-1 uitgegaan worden van onderstaande modelleringsaanpak. Deze aanpak is gebaseerd op het zogenaamde RILEM B4 model (RILEM Technical Committee TC-242-MDC [1]).

Een uitgebreide omschrijving van dit model is gegeven in Bijlage 1 van dit memo. In paragraaf 2.2.3 is voor een aantal parameters in het model een nadere toelichting (of zelfs invulling) voor de kokerbruggen van RWS gegeven. In bijlage 2 is een rekenvoorbeeld opgenomen die kan worden gebruikt om een beter begrip te krijgen van het RILEM B4 model en waarmee een eventuele implementatie in rekensoftware kan worden gecontroleerd.

Disclaimer:

De hier gegeven modelleringsaanpak is gebaseerd de resultaten van één case studie [2]. Hierbij is het door meting vastgestelde vervormingsgedrag over een periode van > 40 jaar vergeleken met

verschillende modelleringsaanpakken voor krimp en kruipgedrag van beton. De hier gegeven aanpak bleek over deze lange periode de opgetreden vervormingen het beste te voorspellen.

Toelichting:

Dit RILEM B4 model is gekalibreerd op langeduur vervormingsmetingen op meerdere bruggen wereldwijd. In Nederland is het recent toegepast bij de herberekening van een uitbouwbrug in lichtbeton, waarbij de voorspellingen volgens het RILEM B4 model met de hier gegeven aanwijzingen voor de invoerparameters de beste voorspelling gaven van het vervormingsgedrag in de tijd t.o.v. de over de loop der jaren uitgevoerde vervormingsmetingen aan de brug. De modellen volgens *fib* ModelCode 78, NEN-EN1992-1-1 en prEN1992-1-1:2023 laten daarentegen allen een significante onderschatting zien van de vervormingen. De voorspelde vervormingen met deze modellen lijken te vroeg af te vlakken, waardoor er na 30 jaar nauwelijks bijkomende krimp en kruip effecten optreden. Het RILEM B4 model laat nog een verdere toename zien tot om en nabij de 60-70 jaar.

2.2.2. Toepassingsgebied RILEM B4 model

Voor het RILEM B4 model is op basis van de uitgevoerde onderzoeken en kalibratie het volgende toepassingsgebied van toepassing:

- $0,22 \leq w/c \leq 0,87$ (water-cement ratio)
- $1,0 \leq a/c \leq 13,2$ (aggregate-cement ratio (op basis van gewicht))
- $15 \text{ MPa} \leq f_{cm} \leq 70 \text{ MPa}$ (gemiddelde cilinderdruksterkte)
- $-25 \text{ °C} \leq T \leq 75 \text{ °C}$ (omgevingstemperatuur)
- $12 \leq V/S \leq 120$ (Volume-surface ratio)

De leeftijd van het beton ten tijde van belasten moet minimaal 1 dag zijn en de minimale doorsnede grootte 51 mm. Het model is nadrukkelijk niet bedoeld voor het modeleren van krimp en kruip in jong beton.

Voor f_{cm} waarden groter dan 70 MPa wordt vooralsnog geadviseerd om ook uit te gaan van het Rilem B4 model.

Toelichting:

Voor f_{cm} waarden groter dan 70 MPa is het Rilem B4 model niet gevalideerd, maar kan zeer zeker niet zondermeer teruggevallen worden op de modellen in NEN-EN1992-1-1 of *fib* ModelCode 2010 / ModelCode 2020.

2.2.3. Belangrijke aandachtspunten RILEM B4 model

Het RILEM B4 model heeft relatief veel parameters, waarbij enkele belangrijke aandachtspunten gelden.

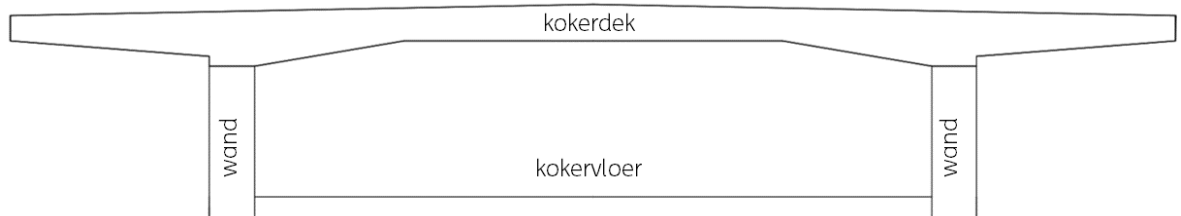
Volume / Omtrek ratio (A_c/O) (fictieve dikte):

Bazant gebruikt in zijn model de “Volume-surface ratio” (V/S) en de parameter “effective cross-section thickness”/“fictieve dikte” (D) met $D=2V/S$. Dit is equivalent met de in NEN-EN1992-1-1 art. 3.1.4 (5) gegeven fictieve dikte $h_0= 2A_c/u$. In de uitwerking in bijlage 1 wordt gebruik gemaakt van A_c / O , met A_c als de oppervlakte en O de omtrek van de betondoorsnede.

- › Voor de bepaling van D moet per dwarsdoorsnede de kokerdoorsnede opgedeeld worden in de volgende afzonderlijke elementen (zie figuur 1):
 - Kokerwanden;
 - Kokervloer;
 - Kokerdek.
- › Per element moet de aan te houden waarde van D worden bepaald. Dit betekent dus ook dat per element andere krimp en kruip waarden aangehouden moeten worden, oftewel per

element een ander materiaal model. Bij een verloop van de hoogte / dikte in de lengterichting van de brug dient daarnaast ook per moot een waarde van D bepaald te worden.

- › Voor het bepalen van de omtrek O moet ook de binnenzijde van de koker worden meegerekend (dit in afwijking t.o.v. de ROK -0083 3.1.4 NEN-EN 1992-1-1).



Figuur 1: Opdeling van kokerdoorsnede in elementen voor de bepaling van D .

OPMERKING 1:

Het aantal aan te houden variaties in de langsrichting van de kokerbrug is afhankelijk van de variatie in de doorsnede-eigenschappen van de koker over de lengte. Vaak kan voor het kokerdek uitgegaan worden van één waarde voor de gehele lengte van de brug. Indien de wanden alleen in hoogte variëren en niet in dikte kan hier ook vaak uitgegaan worden van één gemiddelde waarde over de hele lengte van de brug. Voor kokervloeren van een kokerbrug geldt in de regel dat hier de variatie in dikte over de lengte dermate groot is dat hier per moot uitgegaan moet worden van een andere waarde. Het verschil is met name waar te nemen in de krimp en minder in de kruip.

OPMERKING 2:

In tegenstelling tot de ROK eisen moet men dus uitgaan van binnen- en buitenzijde voor de bepaling van de omtrek. Dit is zo ook door Bazant gedaan bij de kalibratie van het B4 model.

OPMERKING 3:

De studie van Andrade-Borges [2] laat een betere voorspelling van het vervormingsgedrag in de tijd zien wanneer de kokermoten opgeknippt wordt in verschillende elementen (wand/kokervloer/kokerdek). Per element worden dan de parameters bepaald en een materiaalmodel gedefinieerd in het eindige-elementenmodel. In de eerste tien jaar laat het dek van de kokerbrug een relatief snelle uitdroging zien ten opzichte van de dikkere ondervloer, terwijl op de lange termijn het tegenovergestelde het geval is. Hierdoor zal op relatief jonge leeftijd in de berekening de kokerbrug eerst minder doorbuigen laten zien in vergelijking tot een uniform model (d.w.z. een model waarbij slechts één krimp en kruip materiaalmodel is gebruikt), maar ook op latere leeftijd een sterkte toename van doorbuigingen. Met het opknippen in elementen wordt een voorspelling van de vervormingen verkregen welke beter overeenkomt met de werkelijke vervormingen, zoals volgend uit de vergelijking met de vervormingsmetingen.

Tijdstip van belasten

Voor de krimp en kruip parameters mag uitgegaan worden van één tijdstip van aanbrengen van de belasting (t'). Hiervoor kan als uitgangspunt einde van de bouwtijd worden aangehouden. Voor t_0 (tijdstip van start expositie van het beton) kan per moot worden uitgegaan van het tijdstip van ontkisten.

Toelichting:

De studie van Andrade-Borges liet zien dat een maturity independent aanpak met één kruip-compliant curve per element goede resultaten van de langeduur vervormingen uitgaande van tijdsduur van belasten gelijk aan einde bouwphase. Hiermee wordt het aantal in het eindige elementenmodel in te geven aantal curves sterk beperkt.

Relatieve vochtigheid

Voor de relatieve vochtigheid moet worden uitgegaan van 80% (in buitenlucht en boven water).

Temperatuur

Voor de omgevingstemperatuur T moet worden uitgegaan van $T = 10^\circ\text{C}$.

Voor de omgevingstemperatuur tijdens curing T_{cur} moet worden uitgegaan van $T_{\text{cur}} = 10^\circ\text{C}$.

Toelichting:

Het effect van temperatuur op de aan te houden krimp en kruip parameters is volgens een variatie studie op basis van het werk van Andrade-Borges voor de korte termijn beperkt, maar kan van significante invloed zijn op de vervormingen op de lange termijn.

Bij grote afwijking van de voorspelde vervormingen op de gemeten vervormingen wordt aangeraden na te gaan of bovenstaande uitgangspunten voor de specifieke locatie correct zijn. Dit kan door uit te gaan van KNMI data van meetstations nabij de brug, waarbij een jaargemiddelde kan worden berekend op de gerapporteerde etmaalgemiddelde temperatuur. Voor de waarde van T_{cur} moet dan de etmaalgemiddelde temperatuur worden gemiddeld voor de gehele bouwperiode.

Cement sterkteklasse

Indien er geen gegevens over het toegepaste cementtype en cement sterkteklasse bekend zijn, moet worden uitgegaan van Cement klasse N volgens NEN-EN 1992-1-1 art 3.1.2. (6).

Toelichting:

Voor veel uitbouwbruggen was de betonsamenstelling vastgelegd en werd uitgegaan van een Portlandcement Klasse B, zoals destijds leverbaar. Een Portlandcement Klasse B is nu in te delen als een CEM I 42,5N.

Toeslagmateriaal

Voor het type toeslagmateriaal kan voor normaal beton worden uitgegaan van “Quartzite”. Voor lichtbeton kan worden uitgegaan van de parameters volgend uit “Limestone”.

Geometrie parameters k_s

Voor k_s moet in alle gevallen uitgegaan worden van $k_s = 1.0$

Controle aanname lineaire visco-elasticiteit

Na het uitvoeren van de eindige-elementenanalyse moet gecontroleerd worden of onder quasi permanente belastingen de optredende drukspanningen in het beton kleiner of gelijk zijn aan $0,4 f_{\text{cm}}(t_0)$. Indien dit niet het geval is, mag men er niet van uitgaan dat krimp- en kruip effecten gesommeerd kunnen worden uitgaande van lineair visco-elastisch gedrag.

Controle werking kruipmodellering in betonmodel

De wijze waarop kruip meegenomen wordt in de modellering van het materiaalgedrag van beton in de eindige-elementenanalyse moet voor toepassing op een kokerbrug worden geverifieerd door middel van een eenvoudig model. Hiertoe kan gebruik gemaakt worden van een zogenaamde single-element test zoals nader uitgewerkt in Annex C.1 van Andrade-Borges [2] (zie ook bijlage 3).

Toelichting:

Om de rekentijd van kruipberekeningen op grootschalige constructies in eindige-elementenanalyses acceptabel te houden, gebruiken eindige-elementprogramma's vaak een differentiaal vergelijking – in plaats van de meer bekende integraal vergelijking – voor het berekenen van de (kruip)rekken. Dit heeft als groot voordeel dat de spanningshistorie per integratiepunt niet hoeft te worden opgeslagen, maar er slechts

enkele state variabelen per tijdstap dienen te worden geupdate. Daardoor is veel minder geheugen nodig en kan de berekening aanzienlijk sneller worden uitgevoerd. Dit vraagt wel om een conversie van de kruip compliantie curves naar bijbehorende Kelvin chain parameters. Het eindige-elementprogramma DIANA FEA doet dit intern via het oplossen van een optimalisatieprobleem. Ervaring leert dat de resulterende Kelvin chain niet altijd tot een accuraat kruip gedrag leidt. Voor een succesvolle conversie is de gekozen tijdsdiscretisatie voor de kruip compliantie curve van belang. Door voorafgaand aan de analyse op de brug een single-element test (zie bijlage 3) uit te voeren, kan worden nagegaan of de Kelvin chain parameters het kruip gedrag goed beschrijft. Zo niet, dan kan de gekozen tijdsdiscretisatie voor de kruip compliantie curve worden aangepast.

2.2.4. Bepaling tijdsafhankelijke voorspanverliezen

De tijdsafhankelijke verliezen mogen niet worden ingeschat, maar moeten zijn berekend op basis van de berekende vervormingen van het beton als gevolg van krimp en kruip onder blijvende belastingen. Zie hiertoe ook de aanwijzingen in 2.1.

3. Referenties

- [1] Z. P. Bazant en R. Wan-Wendner, „RILEM draft recommendation: TC-242-MDC multi-decade creep and shrinkage of concrete: material model and structural analysis),” *Materials and Structures*, pp. 753-750, April 2015 Vol 48(4).
- [2] E. A. Andrade Borges, „Long term effect of creep and shrinkage on the structural behaviour of balanced cantilever prestressed bridges,” TNO - TU Delft - RWS, Delft, 2023.
- [3] RWS GPO, „Resultaatbeschrijving Verificatieberekening Betonnen Kokerbruggen,” GPO-RWS, Utrecht, 2024.

Bijlage 1: Praktische uitwerking krimp- en kruipmodelle- ring volgens het RILEM B4 Model

Definitie parameters:

t	is de ouderdom van het beton in dagen op het beschouwde tijdstip
t'	is de ouderdom in dagen van het beton bij belasten
t_0	is de ouderdom bij start van de expositie van het beton
$\hat{t}$	het voor temperatuur gecorrigeerde beschouwde tijdstip
$\hat{t}'$	voor temperatuur gecorrigeerd tijdstip van belasten
$\tilde{t}$	voor temperatuur gecorrigeerde tijdsduur van belasten
$\tilde{t}_0$	voor temperatuur gecorrigeerde leeftijd bij start expositie van het beton
$J(\hat{t}, \hat{t}')$ of $J(t, t')$	totale kruip compliance functie (rek op tijdstip $\hat{t}$ of t veroorzaakt door een een-assige blijvende spanning toegepast op ouderdom $\hat{t}'$ of t')
$C_0(\hat{t}, \hat{t}')$	basis kruip compliance functie (is de compliance bij geen vochtuitwisseling)
$C_d(\hat{t}, \hat{t}', \tilde{t}_0)$	compliance functie voor bijkomende kruip door uitdroging
$\varepsilon_{sh}(\tilde{t}, \tilde{t}_0)$	kruipvervorming
$\varepsilon_{sh\infty}(\tilde{t}_0)$	uiterste kruipvervorming van het beton ($\tilde{t}$ tot ∞)
h	relatieve vochtigheid van de omgeving, uitgedrukt in decimalen
T	omgevingstemperatuur
T_{cur}	omgevingstemperatuur tijdens uitharden van beton
U_h, U_s, U_c	activeringsenergie voor hydratatie (subscript h), uitdrogingskrimp (s), en kruip (c)
R	gas constante = 8,314
H	gemiddelde van de relatieve vochtigheid van de poriën over de doorsnede
$S(\tilde{t})$	functie welke de vorm van de krimpcurve omschrijft
τ_{sh}	krimp halveringstijd in dagen
A_d/O	betonoppervlak / omtrek ratio [mm]
D	fictieve dikte bepaald als $2A_c/O$
c	cementgehalte (gewicht per m ³ beton)
w/c	water-cement ratio in het betonmengsel (naar gewicht)
a/c	toeslag-cement ratio in het betonmengsel (naar gewicht)
f'_c	benodigde betondruksterkte
f_{cm}	gemiddelde waarde van de cilinderdruksterkte van beton na 28 dagen
E_{28}	gemiddelde elasticiteitsmodulus van beton op 28 dagen
ρ	soortelijk gewicht van het betonmengsel in kg/m ³

Vergelijkingen

Bepaling equivalente tijd voor verschillende temperaturen

Voor temperatuur gecorrigeerde ouderdom bij belasten:

$$\tilde{t}_0 = t_0 \cdot \beta_{Th} \quad [\text{dagen}]$$

waarin

t_0 is de ouderdom bij start van de expositie van het beton

$$\beta_{Th} = \exp\left(\frac{U_h}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{(T_{cur} + 273)} \right)\right)$$

$$U_h = 3,326 \cdot 10^4$$

Voor temperatuur gecorrigeerde expositietijd

$$\tilde{t} = (t - t_0) \cdot \beta_{Ts} \quad [\text{dagen}]$$

waarin

t is de ouderdom van het beton in dagen op het beschouwde tijdstip

$$\beta_{Ts} = \exp\left(\frac{U_s}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{(T + 273)} \right)\right)$$

$$U_s = 3,326 \cdot 10^4$$

$$\hat{t} = \hat{t}' + (t - t') \cdot \beta_{Tc} \quad [\text{dagen}]$$

waarin

$$\hat{t}' = t' \cdot \beta_{Th}$$

$$\beta_{Tc} = \exp\left(\frac{U_c}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{(T + 273)} \right)\right)$$

$$U_c = 3,326 \cdot 10^4$$

Bepaling krimp parameters

+

Parameter (vert) / Cementtype ¹ (hor.)	N	R	S
τ_{cem} [days]	0.016	0.080	0.010
ρ_{tw}	-0.06	-2.40	3.55
ρ_{tc}	-0.10	-2.70	3.80
ε_{cem}	360×10^{-6}	860×10^{-6}	410×10^{-6}
ρ_{ew}	1.10	-0.27	1.00

¹ Cementtype indeling conform volgens NEN-EN 1992-1-1 art 3.1.2. (6)

Tabel 1: Cementtype afhankelijke krimp parameters

Parameter (vert) / Cementtype ¹ (hor.)	N	R	S
$\tau_{au,cem}$ [days]	1,00	41,00	1,00
$\varepsilon_{au,cem}$	210×10^{-6}	-84×10^{-6}	$0,00 \times 10^{-6}$

¹ Cementtype indeling conform volgens NEN-EN 1992-1-1 art 3.1.2. (6)

Tabel 2: Cementtype afhankelijke autogene krimp parameters

Gemiddelde krimp van een doorsnede:

De gemiddelde krimp van een doorsnede kan worden bepaald als de som van de uitdrogingskrimp en autogene krimp volgens:

$$\varepsilon_{sh,totaal}(\tilde{t}, \tilde{t}_0) = \varepsilon_{sh}(\tilde{t}, \tilde{t}_0) + \varepsilon_{au}(\tilde{t}, \tilde{t}_0)$$

waarin:

$\varepsilon_{sh}(\tilde{t}, \tilde{t}_0)$ de uitdrogingskrimp

$\varepsilon_{au}(\tilde{t}, \tilde{t}_0)$ de autogene krimp

Uitdrogingskrimp

$$\varepsilon_{sh}(\tilde{t}, \tilde{t}_0) = \varepsilon_{sh\infty}(\tilde{t}_0) k_h \cdot S(\tilde{t})$$

waarin:

$$k_h \begin{cases} = 1 - h^3 & h \leq 0,98 \\ = 12,94(1-h) - 0,2 & 0,98 \leq h \leq 1 \end{cases}$$

$$S(\tilde{t}) = \tanh \sqrt{\frac{\tilde{t}}{\tau_{sh}}}$$

$$\tau_{sh} = \tau_0 \cdot k_{ra} (k_s \cdot D \cdot 10^3)^2$$

waarin:

$$\tau_0 = \tau_{cem} \left(\frac{a/c}{6} \right)^{-0,33} \left(\frac{w/c}{0,38} \right)^{p_{tw}} \left(\frac{6,5c}{\rho} \right)^{p_{rc}}$$

waarin:

τ_{cem} ; p_{tw} ; p_{rc} zie tabel 1

k_{ra} = 0,59 voor grindbeton

= 1,80 voor lichtbeton

k_s = 1,0

ρ = 2450 kg / m³ voor grindbeton, indien door meting bekend moet de meetwaarde worden aangehouden
= lichtbeton: zoals aangegeven in RBK 11.3 moet de volumieke massa voor lichtbeton altijd door middel van onderzoek aan de constructie worden vastgesteld. Bij onbekend zijn van type toeslagmateriaal moet worden uitgegaan van 1600 kg/m³

$$D = 2 \cdot A_c / O \text{ [m]}$$

waarin

A_c de oppervlakte van de dwarsdoorsnede van het beton [m²]

O de omtrek van dat deel van de dwarsdoorsnede dat is blootgesteld aan uitdroging [m]

$$\varepsilon_{sh\infty}(\tilde{t}_0) = -\varepsilon_0 \cdot k_{\varepsilon 0} \frac{E(t_1)}{E(t_2)}$$

waarin:

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{cem} \left(\frac{a/c}{6} \right)^{-0,80} \left(\frac{w/c}{0,38} \right)^{p_{\varepsilon w}} \left(\frac{6,5c}{\rho} \right)^{0,11}$$

met ε_{cem} ; $p_{\varepsilon w}$ volgens tabel 1

$k_{\varepsilon 0}$ = 0,71 voor grindbeton

= 0,95 voor lichtbeton

$$t_1 = 7\beta_{Th} + 600\beta_{Ts}$$

$$t_2 = \tilde{t}_0 + \tau_{sh} \cdot \beta_{Ts}$$

$$E(t_i) = E_{28} \sqrt{\frac{t_i}{4[\text{dagen}] + (6/7)t_i}}$$

waarin:

$$E_{28} = 4734 \sqrt{f_{cm}} \text{ met } f_{cm} \text{ in [MPa]}$$

Autogene krimp

$$\varepsilon_{au}(\tilde{t}, \tilde{t}_0) = \varepsilon_{au\infty} \left[1 + \left(\frac{\tau_{au}}{\tilde{t} + \tilde{t}_0} \right)^\alpha \right]^{-4,5}$$

waarin:

$$\alpha = r_\alpha \left(\frac{w/c}{0,38} \right)$$

r_α zoals gegeven in tabel 2

$$\varepsilon_{au,\infty} = -\varepsilon_{au,cm} \left(\frac{a/c}{6} \right)^{-0,75} \left(\frac{w/c}{0,38} \right)^{-3,5}$$

$$\tau_{au} = \tau_{au,cm} \left(\frac{w/c}{0,38} \right)^{3,0}$$

met de parameters $\varepsilon_{au,cm}$ en $\tau_{au,cm}$ volgens tabel 2.

Bepaling kruip parameters

Kruipvervorming onder constante belasting:

$$\varepsilon(t) = J(\hat{t}, \hat{t}') \cdot \sigma + \varepsilon_{sh,totaal}(\tilde{t}, \tilde{t}_0)$$

waarin:

$J(\hat{t}, \hat{t}')$ is de kruip compliance functie op huidige tijd t onder belasting σ
 σ de op tijdstip t' aangebrachte belasting

Totale kruip compliance functie:

$$J(\hat{t}, \hat{t}') = q_1 + R_T \cdot C_0(\hat{t}, \hat{t}') + C_d(\hat{t}, \hat{t}', \tilde{t}_0)$$

waarin:

$$q_1 = \frac{1}{E_0} = \frac{p_1}{E_{28}}$$

met p_1 volgens tabel 3

$$R_T = \exp \left[\frac{U'_c}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T+273} \right) \right]$$

$$C_0(\hat{t}, \hat{t}') = q_2 \cdot Q(\hat{t}, \hat{t}') + q_3 \ln \left[1 + \left(\frac{\hat{t} - \hat{t}'}{1[\text{dag}]} \right)^{0,1} \right] + q_4 \ln \left(\frac{\hat{t}}{\hat{t}'} \right)$$

waarin

$$q_2 = \frac{p_2}{1[\text{GPa}]} \left(\frac{w/c}{0,38} \right)^{3,0}$$

met p_2 volgens tabel 3

$$Q(\hat{t}, \hat{t}') = Q_f(\hat{t}') \left(1 + \left(\frac{Q_f(\hat{t}')}{Z(\hat{t}, \hat{t}')} \right)^{r(\hat{t})} \right)^{-\frac{1}{r(\hat{t})}}$$

$$Q_f(\hat{t}') = \left[0,086 \left(\frac{\hat{t}'}{1[\text{dag}]} \right)^{\frac{2}{9}} + 1,21 \left(\frac{\hat{t}'}{1[\text{dag}]} \right)^{\frac{4}{9}} \right]^{-1}$$

$$r(\hat{t}) = 1,7 \left(\frac{\hat{t}}{1[\text{dag}]} \right)^{0,12} + 8$$

$$Z(\hat{t}, \hat{t}') = \left(\frac{\hat{t}'}{1[\text{dag}]} \right)^{-0,5} \ln \left[1 + \left(\frac{\hat{t} - \hat{t}'}{1[\text{dag}]} \right)^{0,1} \right]$$

$$q_3 = 39,3 \cdot 10^{-3} \cdot q_2 \left(\frac{a/c}{6} \right)^{-1,1} \left(\frac{w/c}{0,38} \right)^{0,4}$$

$$q_4 = \frac{3,4 \cdot 10^{-3}}{1[\text{GPa}]} \left(\frac{a/c}{6} \right)^{-0,9} \left(\frac{w/c}{0,38} \right)^{2,45}$$

$$C_d(\hat{t}, \hat{t}', \tilde{t}_0) = q_5 \left\langle \exp[-p_{5H} \cdot H(\hat{t}, \tilde{t}_0)] - \exp[-p_{5H} \cdot H_c(\hat{t}_0, \tilde{t}_0)] \right\rangle^{0,5}$$

$$q_5 = \frac{p_5}{1[\text{GPa}]} \left(\frac{a/c}{6} \right)^{-1,0} \left(\frac{w/c}{0,38} \right)^{0,75} \left| k_h \cdot \varepsilon_{sho}(\tilde{t}_0) \right|^{-0,85}$$

met p_5 en p_{5H} volgens tabel 3

$$H(\hat{t}, \tilde{t}_0) = 1 - (1-h) \tanh \sqrt{\frac{\hat{t} - \tilde{t}_0}{\tau_{sh}}}$$

$$H_c(\hat{t}_0, \tilde{t}_0) = 1 - (1-h) \tanh \sqrt{\frac{\hat{t}_0 - \tilde{t}_0}{\tau_{sh}}}$$

Parameter (vert) / Cementtype ¹ (hor.)	N	R	S
p_1	0,70	0,60	0,80
p_2	$58,6 \cdot 10^{-3}$	$17,4 \cdot 10^{-3}$	$40,5 \cdot 10^{-3}$
p_5	$777 \cdot 10^{-6}$	$94,6 \cdot 10^{-6}$	$496 \cdot 10^{-6}$
p_{5H}	8,00	1,00	$8,00^2$

¹ Cementtype indeling conform volgens NEN-EN 1992-1-1 art 3.1.2. (6)

² aanname i.v.m. ontbreken van meetdata

Tabel 3: Cementtype afhankelijke kruip parameters

Bijlage 2: Rekenvoorbeeld RILEM B4 Model

Voorbeeld rekenmodel B4 o.b.v. artikel "Model B4 for Creep, Drying Shrinkage and Autogenous Shrinkage of Normal and High-Strength Concretes with Multi-Decade Applicability1 - P. Bazant - R. Wan-Wendner - Materials and structures - april 2015 - DOI: 10.1617/s11527-014-0485-2

Input tabellen Bazant:

$$T2 := \begin{bmatrix} 0 & \text{"N"} & \text{"R"} & \text{"S"} \\ \text{"}\tau_{\text{au,cem}}\text{"} & 1.00 & 41.0 & 1.00 \\ \text{"}r_{\tau w}\text{"} & 3.00 & 3.00 & 3.00 \\ \text{"}r_t\text{"} & -4.50 & -4.50 & -4.50 \\ \text{"}r_{\alpha}\text{"} & 1.0 & 1.4 & 1.0 \\ \text{"}\epsilon_{\text{au,cem}}\text{"} & 210 \cdot 10^{-6} & -84 \cdot 10^{-6} & 0 \cdot 10^{-6} \\ \text{"}r_{\epsilon a}\text{"} & -0.75 & -0.75 & -0.75 \\ \text{"}r_{\epsilon w}\text{"} & -3.50 & -3.50 & -3.50 \end{bmatrix}$$

$$T3 := \begin{bmatrix} 0 & \text{"N"} & \text{"R"} & \text{"S"} \\ \text{"p1"} & 0.7 & 0.8 & 0.9 \\ \text{"p2"} & 58.6 \cdot 10^{-3} & 17.4 \cdot 10^{-3} & 40.5 \cdot 10^{-3} \\ \text{"p3"} & 39.3 \cdot 10^{-3} & 39.3 \cdot 10^{-3} & 39.3 \cdot 10^{-3} \\ \text{"p4"} & 3.4 \cdot 10^{-3} & 3.4 \cdot 10^{-3} & 3.4 \cdot 10^{-3} \\ \text{"p5"} & 777 \cdot 10^{-6} & 94.6 \cdot 10^{-6} & 496 \cdot 10^{-6} \\ \text{"p5H"} & 8.00 & 1.00 & 8.00 \\ \text{"p2w"} & 3.00 & 3.00 & 3.00 \\ \text{"p3a"} & -1.10 & -1.10 & -1.10 \\ \text{"p3w"} & 0.40 & 0.40 & 0.40 \\ \text{"p4a"} & -0.90 & -0.90 & -0.90 \\ \text{"p4w"} & 2.45 & 2.45 & 2.45 \\ \text{"p5\epsilon"} & -0.85 & -0.85 & -0.85 \\ \text{"p5a"} & -1.00 & -1.00 & -1.00 \\ \text{"p5w"} & 0.78 & 0.78 & 0.78 \end{bmatrix}$$

$$T6 := \begin{bmatrix} 0 & \text{"k_{ra}} & \text{"k_{\epsilon a}} \\ \text{"Diabese"} & 0.06 & 0.76 \\ \text{"Quartzite"} & 0.59 & 0.71 \\ \text{"Limestone"} & 1.80 & 0.95 \\ \text{"Sandstone"} & 2.30 & 1.60 \\ \text{"Granite"} & 4.00 & 1.05 \\ \text{"Quartz Diorite"} & 15.0 & 2.2 \end{bmatrix} \quad T1 := \begin{bmatrix} 0 & \text{"N"} & \text{"R"} & \text{"S"} \\ \text{"}\tau_{\text{cem}}\text{"} & 0.016 & 0.08 & 0.010 \\ \text{"p}_{\tau a}\text{"} & -0.33 & -0.33 & -0.33 \\ \text{"p}_{\tau w}\text{"} & -0.06 & -2.40 & 3.55 \\ \text{"p}_{\tau c}\text{"} & -0.10 & -2.70 & 3.80 \\ \text{"}\epsilon_{\text{cem}}\text{"} & 360 \cdot 10^{-6} & 860 \cdot 10^{-6} & 410 \cdot 10^{-6} \\ \text{"p}_{\epsilon a}\text{"} & -0.80 & -0.80 & -0.80 \\ \text{"p}_{\epsilon w}\text{"} & 1.10 & -0.27 & 1.00 \\ \text{"p}_{\epsilon c}\text{"} & 0.11 & 0.11 & 0.11 \end{bmatrix}$$

Input gegevens voorbeeld:

Cement Type applied: Type I Cement = Normaal volgens EC2 = N

$CementType := \text{"N"}$ (Kies N R of S)

$t := 112$ Ouderdom beton ten tijde van bepaling krimp en kruip

$t' := 28$ Ouderdom beton ten tijde van belasten

$t_0 := 28$ ouderdom wanneer uitdroging begint

$h := 0.50$ luchtvochtigheid in decimalen

$f_{cm} := 27.6 \text{ MPa}$

$VS_{ratio} := 19.05 \text{ m}$ Betonoppervlak / Omtrek ratio

$c := 219.3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ Cement gehalte (massa per m^3 beton)

$wc_{ratio} := 0.60$ Water Cement ratio

$ac_{ratio} := 7.0$ "Aggregate/cement ratio in het mengsel (per massa)

$\sigma := 11.03 \text{ MPa}$ Aangebrachte drukspanning in het beton

$\rho := 2350 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ (Normaal beton 2350 / Lichtbeton volgens meting of RBK)

$k_s := 1.00$ Keuze Bazant voor voorbeeld niet specifiek gegeven.

$k_{ra} := 1.00$ Keuze Bazant voor voorbeeld niet specifiek gegeven.

$k_{\varepsilon a} := 1$ Is in voorbeeld op 1 gezet, min of meer toeslagmateriaal onafhankelijk

$E_{28} := 4734 \cdot \sqrt{f_{cm} \cdot \text{MPa}} = 24.87 \text{ GPa}$

$R := 8.314$ gas constante

$U_h := R \cdot 4000 = 33.256 \cdot 10^3$ $U_c := U_h$ $U_s := U_h$

$$T := 20$$

$$T_{cur} := 20$$

Berekening:

Equivalenten tijd voor verschillende temperaturen

$$\beta_{Ts} := \exp \left(\frac{U_s}{R} \cdot \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{(T + 273)} \right) \right) = 1$$

$$\beta_{Th} := \exp \left(\frac{U_h}{R} \cdot \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{(T_{cur} + 273)} \right) \right) = 1$$

$$\beta_{Tc} := \exp \left(\frac{U_c}{R} \cdot \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{(T + 273)} \right) \right) = 1$$

Voor temperatuur gecorrigeerde ouderdom bij belasten

$$t_{c0} := t_0 \cdot \beta_{Th} = 28 \quad [\text{dagen}]$$

Voor temperatuureffect gecorrigeerde expositietijd

$$t_c := (t - t_0) \cdot \beta_{Ts} = 84 \quad [\text{dagen}]$$

$$t'_{dc} := t' \cdot \beta_{Th} = 28 \quad [\text{dagen}]$$

$$t_{dc} := t'_{dc} + (t - t') \cdot \beta_{Tc} = 112 \quad [\text{dagen}]$$

Krimp

$$\tau_0 := \tau_{cem} \cdot \left(\frac{aC_{ratio}}{6} \right)^{p_{ra}} \cdot \left(\frac{wC_{ratio}}{0.38} \right)^{p_{rw}} \cdot \left(6.5 \cdot \frac{c}{\rho} \right)^{p_{rc}} = 15.55 \cdot 10^{-3} \quad [\text{dagen}]$$

$$D := 2 \cdot VS_{ratio} = 38.1 \text{ m}$$

$$\tau_{sh} := \tau_0 \cdot k_{ra} \cdot \left(k_s \cdot \frac{D}{1 \text{ m}} \right)^2 = 22.58 \quad [\text{dagen}]$$

Uitdrogingskrimp

$$\varepsilon_0 := \varepsilon_{cem} \cdot \left(\frac{aC_{ratio}}{6} \right)^{p_{ea}} \cdot \left(\frac{wC_{ratio}}{0.38} \right)^{p_{ew}} \cdot \left(6.5 \cdot \frac{c}{\rho} \right)^{p_{ec}} = 497.8 \cdot 10^{-6}$$

Krimpcorrectie voor effect veroudering op stijfheid

$$R_T := \exp \left(\frac{U_c}{R} \cdot \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T + 273} \right) \right) = 1 \quad \text{Factor voor temp. effecten}$$

$$d_{temp} := 7 \cdot \beta_{Th} + 600 \cdot \beta_{Ts} = 607$$

$$d_{tijd} := t_{c0} + \tau_{sh} \cdot \beta_{Ts} = 50.578$$

Input parameters voor
E_temp

$$E_{temp} := E_{28} \cdot \sqrt{\left(\frac{d_{temp}}{4 + \frac{6}{7} \cdot d_{temp}} \right)} = 26.76 \text{ GPa}$$

$$E_{tijd} := E_{28} \cdot \sqrt{\left(\frac{d_{tijd}}{4 + \frac{6}{7} \cdot (d_{tijd})} \right)} = 25.7 \text{ GPa}$$

Krimpcorrectie voor verouderingseffect op stijfheid

$$\varepsilon_{sh\infty} := -\varepsilon_0 \cdot k_{\varepsilon a} \cdot \frac{E_{temp}}{E_{tijd}} = -518.3 \cdot 10^{-6}$$

Tijdscurve

$$S_t := \tanh \left(\sqrt{\frac{t_c}{\tau_{sh}}} \right) = 958.64 \cdot 10^{-3}$$

$$k_h := \begin{cases} \text{if } h \leq 0.98 \\ \quad \left| 1 - h^3 \right| \\ \text{if } h > 0.98 \\ \quad \left| 12.94 (1 - h) - 0.2 \right| \end{cases}$$

$$k_h = 875 \cdot 10^{-3}$$

Uitdrogingskrimp

$$\varepsilon_{sh} := \varepsilon_{sh\infty} \cdot k_h \cdot S_t = -434.7 \cdot 10^{-6}$$

Autogene krimp - eind

$$\varepsilon_{au\infty} := -\varepsilon_{au_cem} \cdot \left(\frac{ac_{ratio}}{6} \right)^{r_{\varepsilon a}} \cdot \left(\frac{wc_{ratio}}{0.38} \right)^{r_{\varepsilon w}} = [-37.82 \cdot 10^{-6}]$$

Autogene krimp - halverwege

$$\tau_{au} := \tau_{au_cem} \cdot \left(\frac{wc_{ratio}}{0.38} \right)^{r_{\tau w}} = 3.94 \quad [\text{dagen}]$$

Temperatuur gecorrigeerde Autogene krimpverkorting

$$\alpha := r_{\alpha} \cdot \left(\frac{wc_{ratio}}{0.38} \right) = [1.579]$$

$$\varepsilon_{au} := \varepsilon_{au\infty} \cdot \left(1 + \left(\frac{\tau_{au}}{t_c + t_{c0}} \right)^{\alpha} \right)^{-4.5} = -36.971 \cdot 10^{-6}$$

Totale krimpverkorting

$$\varepsilon_{sh_total} := \varepsilon_{sh} + \varepsilon_{au} = -471.7 \cdot 10^{-6}$$

Basiskruip bepaling

Invoerparameters

$$q_1 := \frac{p_1}{E_{28}} = [28.15 \cdot 10^{-6}] \frac{1}{\text{MPa}}$$

$$q_2 := \frac{p_2}{1 \text{ GPa}} \cdot \left(\frac{wc_{ratio}}{0.38} \right)^{p_{2w}} = (230.68 \cdot 10^{-6}) \frac{1}{\text{MPa}} \quad \text{Aging viscoelastic creep}$$

$$q_3 := p_3 \cdot q_2 \cdot \left(\frac{ac_{ratio}}{6} \right)^{p_{3a}} \cdot \left(\frac{wc_{ratio}}{0.38} \right)^{p_{3w}} = [9.185 \cdot 10^{-6}] \frac{1}{\text{MPa}} \quad \text{Non-aging viscoelastic creep}$$

$$q_4 := \frac{p_4}{1 \text{ GPa}} \cdot \left(\frac{ac_{ratio}}{6} \right)^{p_{4a}} \cdot \left(\frac{wc_{ratio}}{0.38} \right)^{p_{4w}} = [9.062 \cdot 10^{-6}] \frac{1}{\text{MPa}}$$

$$r := 1.7 \cdot \left(\frac{t'_{dc}}{1} \right)^{0.12} + 8 = 10.54$$

$$Z := \left(\frac{t'_{dc}}{1} \right)^{-0.5} \cdot \ln \left(1 + \left(\frac{t_{dc} - t'_{dc}}{1} \right)^{0.1} \right) = 177.46 \cdot 10^{-3}$$

$$Q_f := \left(0.086 \cdot \left(\frac{t'_{dc}}{1} \right)^{\frac{2}{9}} + 1.21 \cdot \left(\frac{t'_{dc}}{1} \right)^{\frac{4}{9}} \right)^{-1} = 181.785 \cdot 10^{-3}$$

$$Q := Q_f \cdot \left(1 + \left(\frac{Q_f}{Z} \right)^r \right)^{\frac{-1}{r}} = 168.045 \cdot 10^{-3}$$

Basiskruip

$$C_0 := q_2 \cdot Q + q_3 \cdot \ln \left(1 + \left(\frac{t_{dc} - t'_{dc}}{1} \right)^{0.1} \right) + q_4 \cdot \ln \left(\frac{t_{dc}}{t'_{dc}} \right) = [59.95 \cdot 10^{-6}] \frac{1}{MPa}$$

Uitdrogingskruip bepaling

$$q_5 := \frac{p_5}{1 \text{ } GPa} \cdot \left(\frac{ac_{ratio}}{6} \right)^{p_{5a}} \cdot \left(\frac{wc_{ratio}}{0.38} \right)^{p_{5w}} \cdot |k_h \cdot \varepsilon_{sh\infty}|^{p_{5\varepsilon}} = (660.9 \cdot 10^{-6}) \frac{1}{MPa}$$

$$H := 1 - (1 - h) \cdot \tanh \left(\sqrt{\frac{t_{dc} - t_{c0}}{\tau_{sh}}} \right) = 0.5207$$

$$H_c := 1 - (1 - h) \cdot \tanh \left(\sqrt{\frac{(\max(t'_{dc}, t_{c0})) - t_{c0}}{\tau_{sh}}} \right) = 1$$

Uitdrogingskruip

$$C_d := q_5 \cdot (\exp(-p_{5H} \cdot H) - \exp(-p_{5H} \cdot H_c))^{0.5} = [81.44 \cdot 10^{-6}] \frac{1}{MPa}$$

Totale vergelijking

$$J := q_1 + R_T \cdot C_0 + C_d = [169.5 \cdot 10^{-6}] \frac{1}{MPa}$$

Kruipvervorming onder constante spanning

$$\varepsilon := J \cdot \sigma - \varepsilon_{sh_total} = [2.342 \cdot 10^{-3}]$$

Overzicht niet zichtbaar weergegeven parameters

$$\tau_{cem} := (\text{vhlookup}(\text{"}\tau_{cem}\text{"}, CementType, T1, \text{"eq"})) = [16 \cdot 10^{-3}]$$

$$p_{\tau a} := (\text{vhlookup}(\text{"}\tau_a\text{"}, CementType, T1, \text{"eq"})) = [-330 \cdot 10^{-3}]$$

$$p_{\tau w} := (\text{vhlookup}(\text{"}\tau_w\text{"}, CementType, T1, \text{"eq"})) = [-60 \cdot 10^{-3}]$$

$$p_{\tau c} := (\text{vhlookup}(\text{"}\tau_c\text{"}, CementType, T1, \text{"eq"})) = [-100 \cdot 10^{-3}]$$

$$\varepsilon_{cem} := (\text{vhlookup}(\text{"}\varepsilon_{cem}\text{"}, CementType, T1, \text{"eq"})) = [360 \cdot 10^{-6}]$$

$$p_{\varepsilon a} := (\text{vhlookup}(\text{"}\varepsilon_a\text{"}, CementType, T1, \text{"eq"})) = [-800 \cdot 10^{-3}]$$

$$p_{\varepsilon w} := (\text{vhlookup}(\text{"}\varepsilon_w\text{"}, CementType, T1, \text{"eq"})) = [1.1]$$

$$p_{\varepsilon c} := (\text{vhlookup}(\text{"}\varepsilon_c\text{"}, CementType, T1, \text{"eq"})) = [110 \cdot 10^{-3}]$$

$$\varepsilon_{au,cem} := (\text{vhlookup}(\text{"}\varepsilon_{au,cem}\text{"}, CementType, T2, \text{"eq"})) = [210 \cdot 10^{-6}]$$

$$r_{\varepsilon a} := (\text{vhlookup}(\text{"}\varepsilon_a\text{"}, CementType, T2, \text{"eq"})) = [-750 \cdot 10^{-3}]$$

$$r_{\varepsilon w} := (\text{vhlookup}(\text{"}\varepsilon_w\text{"}, CementType, T2, \text{"eq"})) = [-3.5]$$

$$\tau_{au,cem} := (\text{vhlookup}(\text{"}\tau_{au,cem}\text{"}, CementType, T2, \text{"eq"})) = [1]$$

$$r_{\tau w} := (\text{vhlookup}(\text{"}\tau_w\text{"}, CementType, T2, \text{"eq"})) = [3]$$

$$r_{\alpha} := (\text{vhlookup}(\text{"}\alpha\text{"}, CementType, T2, \text{"eq"})) = [1]$$

$$r_t := (\text{vhlookup}(\text{"}\tau_t\text{"}, CementType, T2, \text{"eq"})) = [-4.5]$$

$$p_1 := (\text{vhlookup}(\text{"}p_1\text{"}, CementType, T3, \text{"eq"})) = [700 \cdot 10^{-3}]$$

$$p_2 := (\text{vhlookup}(\text{"}p_2\text{"}, CementType, T3, \text{"eq"})) = [58.6 \cdot 10^{-3}]$$

$$p_{2w} := (\text{vhlookup}(\text{"p2w"}, \text{CementType}, T3, \text{"eq"})) = [3]$$

$$p_{3w} := (\text{vhlookup}(\text{"p3w"}, \text{CementType}, T3, \text{"eq"})) = [400 \cdot 10^{-3}]$$

$$p_{3a} := (\text{vhlookup}(\text{"p3a"}, \text{CementType}, T3, \text{"eq"})) = [-1.1]$$

$$p_3 := (\text{vhlookup}(\text{"p3"}, \text{CementType}, T3, \text{"eq"})) = [39.3 \cdot 10^{-3}]$$

$$p_{4w} := (\text{vhlookup}(\text{"p4w"}, \text{CementType}, T3, \text{"eq"})) = [2.45]$$

$$p_{4a} := (\text{vhlookup}(\text{"p4a"}, \text{CementType}, T3, \text{"eq"})) = [-900 \cdot 10^{-3}]$$

$$p_4 := (\text{vhlookup}(\text{"p4"}, \text{CementType}, T3, \text{"eq"})) = [3.4 \cdot 10^{-3}]$$

$$p_{5w} := (\text{vhlookup}(\text{"p5w"}, \text{CementType}, T3, \text{"eq"})) = [780 \cdot 10^{-3}]$$

$$p_{5a} := (\text{vhlookup}(\text{"p5a"}, \text{CementType}, T3, \text{"eq"})) = [-1]$$

$$p_5 := (\text{vhlookup}(\text{"p5"}, \text{CementType}, T3, \text{"eq"})) = [777 \cdot 10^{-6}]$$

$$p_{5\varepsilon} := (\text{vhlookup}(\text{"p5\varepsilon"}, \text{CementType}, T3, \text{"eq"})) = [-850 \cdot 10^{-3}]$$

$$p_{5H} := (\text{vhlookup}(\text{"p5H"}, \text{CementType}, T3, \text{"eq"})) = [8]$$

Bijlage 3: Rekenvoorbeeld - Controle werking kruipmo- delling in betonmodel

C.1. Example 1: Single-cell element

With the release of DIANA FEA 10.7, it became possible to incorporate maturity effects into the creep compliance curves for a material model. To test this new functionality, a single-cell element test was proposed. Single-cell tests use only one finite element to validate results.

C.1.1. Model information

The single-cell element was modeled with a four-node quadrilateral isoparametric plane stress element. The height, width, and thickness are 1 m. As per boundary conditions, the element is only restricted for translations. For the upper and lower left corners, the restriction is in *x-direction*, and for the lower left and right in *y-direction*. Per definition, the mesh comprises only one cell. The mesh, boundary conditions, and loading can be observed in Figure C.1.

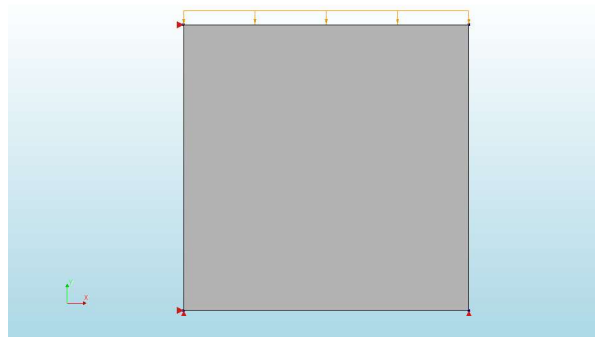


Figure C.1: View of the single-cell element model in DIANA FEA.

This single-cell element is subjected to five different distributed loads, each with a magnitude of -1×10^6 N/m². Each load generates a stress $\Delta\sigma$ of 1 N/mm² at a different time of loading, as seen in Figure C.2. The analysis is conducted until day number 40.

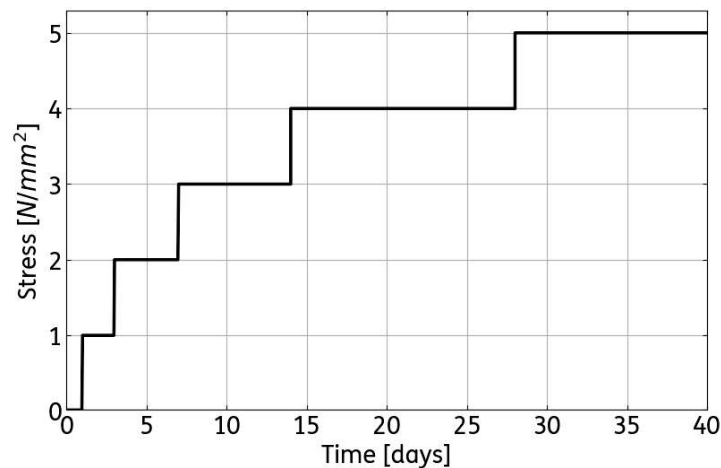


Figure C.2: Applied stress over time.

The compliance curves are constructed based on the creep model outlined in Eurocode 2 [50]. As a benchmark for comparison, the strain over time was initially derived through manual calculations. First,

the creep compliance curve for each time of loading was obtained. Given the stress $\Delta\sigma$ is equal to 1 N/mm², each creep compliance curve is equivalent to the Δ strain over time. Finally, superposition is applied to obtain the total response. This result, shown in Figure C.3, is denoted as the ground truth and serves as the reference for validating the implementation of maturity effects within DIANA FEA 10.7.

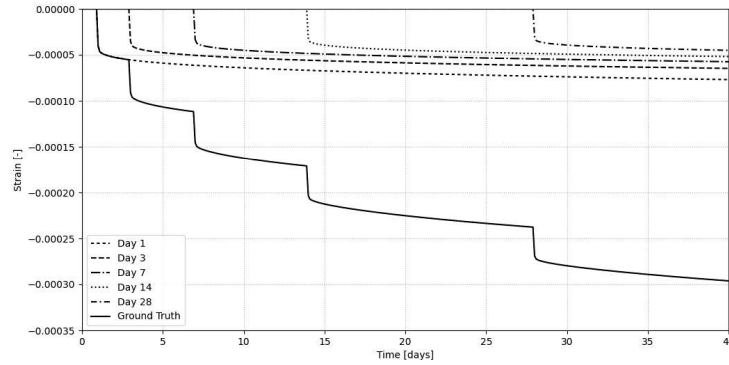


Figure C.3: Δ and total strain (ground truth) over time.

C.1.2. Results

Three scenarios were tested in this minimal example: (i) the treatment of the input, (ii) the interpolation capabilities, and (iii) the impact of accounting for maturity effects. The first scenario is meant to verify that the output, which in this case is the strain over time, corresponds to the input provided to the model. To achieve this, the individual creep compliance curves for all the times of loading were incorporated into the material model. As seen in C.4, the output from the FE model aligns with the ground truth.

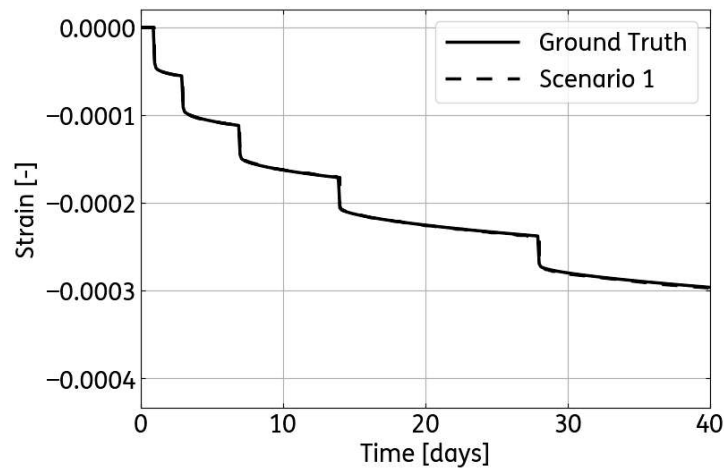


Figure C.4: Strain over time, Scenario 1.

In the Rooyensteinse Brug, every segment is subjected to multiple loads at different concrete ages. This is particularly true for tendon prestressing, which continues to affect segments until the construction

is complete. Incorporating creep compliance curves for all these different times of loading is computationally expensive. Therefore, the objective of Scenario 2 is to evaluate the interpolation capability of DIANA 10.7. For this, two cases are considered, each with a different amount of compliance curves added to the model. The creep compliance curves for each case are indicated in Table C.2. The results for Scenario 2.a and Scenario 2.b are depicted in Figures C.5 and C.6, respectively. Scenario 2 shows the importance of incorporating an adequate number of creep compliance curves at early ages to ensure an accurate interpolation. This can be observed in the significant improvement seen in Figure C.6 compared to C.5 when the compliance curve for loading at 1 day is included. It is also worth noting that inadequate interpolation can result in an underestimation of the strain evolution over time, as evident in the results from Scenario 2.b.

Times of loading [days]	Scenario 2.a	Scenario 2.b
1		X
3		
7	X	X
14	X	X
28	X	X

Table C.2: Compliance curves per case, Scenario 2.

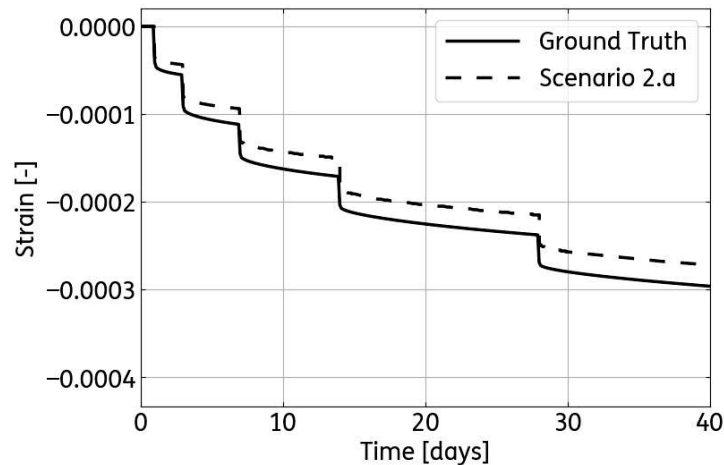


Figure C.5: Strain over time for Scenario 2.a.

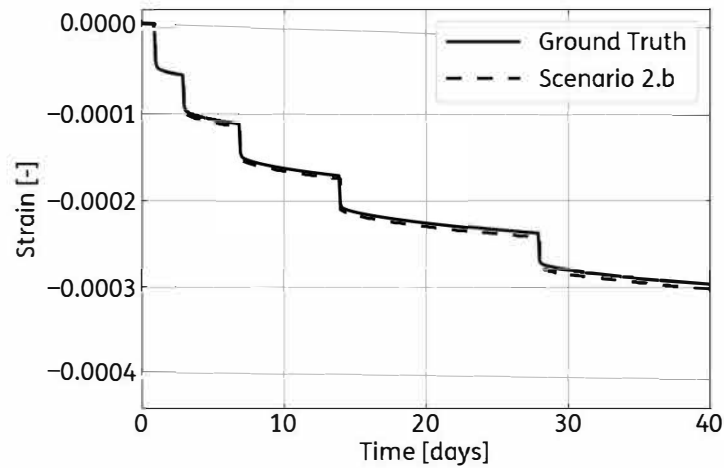


Figure C.6: Strain over time for Scenario 2.b.

Scenario 3 is designed to illustrate the impact of omitting maturity effects from the creep analysis. For this example, only the compliance curve corresponding to a time of loading of 1 day is generated, being shifted for each subsequent loading time. Figure C.7 provides a visual comparison between the ground truth and the strain evolution when maturity effects are not considered. The observed deviation between the curves is approximately 22%. While the overestimation of strain over time when maturity effects are excluded might suggest a conservative prediction, as demonstrated in scenario 2.b, it is evident that overestimation is not a consistent outcome. Furthermore, the primary goal of this project is to develop a detailed finite element model for a balanced cantilever bridge, and disregarding maturity effects fails to capture the actual time-dependent behavior.

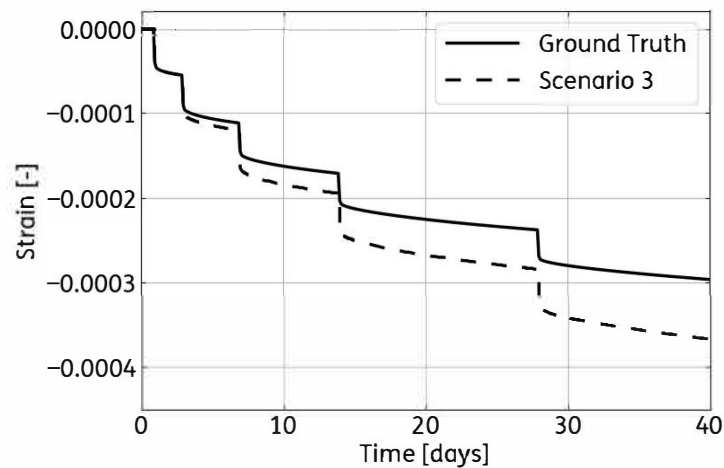


Figure C.7: Strain over time, Scenario 3.