

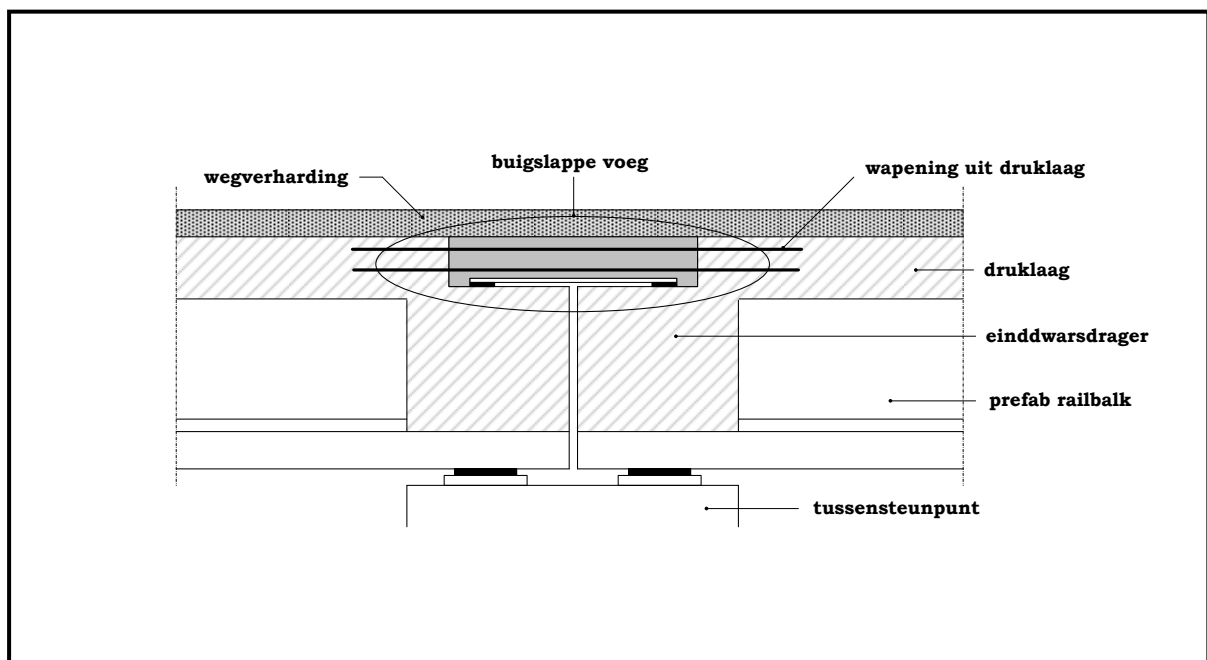


Rijkswaterstaat Technisch Document (RTD)

Buigslappe voegen

Doc.nr.: RTD 1023
Versie: 1.2
Status: Definitief
Datum: 24 januari 2017

Water. Wegen. Werken. Rijkswaterstaat.



Richtlijn Buigslappe voegen

RTD 1023:2017

Datum	24 januari 2017
Status	versie 1.2, definitief

Colofon

Uitgegeven door

Rijkswaterstaat

Informatie

rok-info@rws.nl

Datum

24 januari 2017

Status

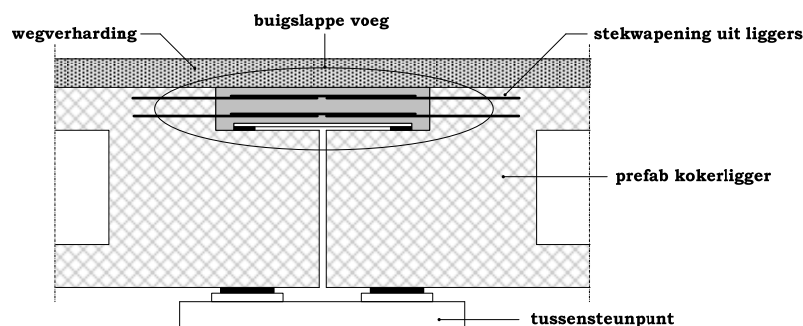
Definitief

Versienummer

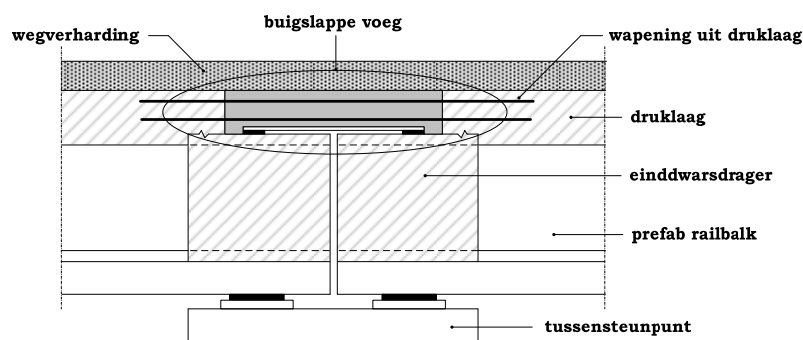
1.2

Voorwoord

Buigslappe voegen worden in Nederland al tientallen jaren toegepast als voegovergang tussen brugdekken uit geprefabriceerde betonnen liggers. De buigslappe voeg bestaat uit een relatief dunne, gewapende betonnen plaat onder het asfalt, die middels wapening is verbonden met beide aangrenzende brugdekken. Buigslappe voegen worden het meest toegepast bij brugdekken die zijn opgebouwd uit prefab kokerliggers (figuur 1) of uit railbalken met druklaag (figuur 2).



Figuur 1: Principe buigslappe voeg bij prefab kokerliggers



Figuur 2: Principe buigslappe voeg bij prefab railbalken met druklaag

De buigslappe voeg moet in staat zijn om opgelegde vervormingen vanuit de aangrenzende velden te ondergaan en trekkrachten door te geven zonder dat ontoelaatbare scheurvorming in de voeg ontstaat. Daarnaast moet de voeg in staat zijn om de verkeersbelasting op de voeg (wielprenten) af te dragen naar de aangrenzende brugdekken.

Eind jaren '90 is door Rijkswaterstaat een standaarddetail voor de buigslappe voeg ontwikkeld, dat samen met andere standaarddetails was opgenomen in NBD00730 "Standaarddetails voor Betonnen Bruggen". Als gevolg van de invoering van de Eurocodes is het noodzakelijk gebleken om het oude standaarddetail te herzien, met name vanwege een toename van de belasting door wielprenten. In RTD 1023 zijn nieuwe standaarddetails gegeven en zijn eisen en aanwijzingen gegeven voor het ontwerp en de berekening van buigslappe voegen buiten het toepassingsgebied van de standaarddetails.

Voor tekeningen van de nieuwe standaarddetails voor buigslappe voegen wordt verwezen naar RTD 1010 "Standaarddetails betonnen bruggen".

Inhoudsopgave

	Voorwoord	4
1	Algemeen	6
1.1	Onderwerp en toepassingsgebied	6
1.2	Leeswijzer	6
1.3	Terminologie	6
2	Overzicht verwijzingen	7
3	Eisen	8
3.1	Functionele eisen	8
3.2	Verificatiemethoden	8
3.3	Ontwerpeisen	8
3.4	Uitvoeringseisen	9
4	Standaarddetails	10
4.1	Toepassingsgebied	10
4.2	Brugdekken uit railbalken met druklaag	10
4.3	Brugdekken uit kokerliggers	11
5	Aanwijzingen voor het ontwerp en de berekening	12
5.1	Algemeen	12
5.2	Rekenmethodiek	12
5.3	Belastingsgevallen	16
5.4	Belastingscombinaties	21
5.5	Berekeningen van momenten en staalspanningen	22
5.6	Resultaten parameterstudie	23
5.7	Scheve kruisingen	24

1 Algemeen

1.1 Onderwerp en toepassingsgebied

Deze RTD is van toepassing op buigslappe voegen die worden toegepast als voegovergang in bruggen. In het kader van deze RTD wordt een buigslappe voeg gedefinieerd als een betonnen plaat onder de wegverharding, die is voorzien van traditionele wapening en die door middel van (stek)wapening is verbonden aan beide aansluitende betonconstructies (brugdek of steunpunt).

1.2 Leeswijzer

Hoofdstuk 3 bevat eisen voor het ontwerp en de berekening van een buigslappe voeg en is normatief. Informatieve en toelichtende teksten zijn in dat hoofdstuk *in cursief* weergegeven.

Hoofdstuk 4 geeft standaarddetails voor buigslappe voegen, die onder bepaalde voorwaarden mogen worden toegepast. In hoofdstuk 5 zijn aanwijzingen gegeven voor situaties buiten het toepassingsgebied van de standaarddetails. Hoofdstukken 4 en 5 zijn beide als advies bedoeld (niet normatief).

1.3 Terminologie

Term	Uitleg
buigslappe voeg	betonnen plaat onder de wegverharding, die is voorzien van traditionele wapening en die door middel van (stek)wapening is verbonden aan beide aansluitende betonconstructies (brugdek of steunpunt)
ongedilateerde lengte	afstand tussen de voegovergangen; bij toepassing van slechts één voegovergang geldt 2x de bruglengte
voegovergang	een voegconstructie waar lengteveranderingen van het brugdek ongehinderd kunnen plaatsvinden (dit geldt niet voor de buigslappe voeg)

2 Overzicht verwijzingen

Document (versie)	Titel
RWS Richtlijnen :	
RTD1001 (2017)	ROK 1.4 – Richtlijnen Ontwerpen Kunstwerken
RTD1007-2 (2014)	Eisen voor voegovergangen, versie 3.0, d.d. 1-12-2014
RTD1010 (2017)	Standaarddetails betonnen bruggen
Eurocodedelen :	
NEN-EN 1990 + NB (zie ROK)	Eurocode – Grondslagen van het constructief ontwerp
NEN-EN 1991-2+NB (zie ROK)	Eurocode 1: Belastingen op constructies – Deel 2: Verkeersbelasting op bruggen
NEN-EN 1992-1-1+NB (zie ROK)	Eurocode 2: Ontwerp en berekening van betonconstructies – Deel 1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen
NEN-EN 1992-2+NB (zie ROK)	Eurocode 2: Ontwerp en berekening van betonconstructies – Deel 2: Betonnen bruggen – Regels voor ontwerp, berekening en detaillering
Overige NEN normen:	
NEN-EN 13670 (zie ROK)	Het vervaardigen van betonconstructies

3 Eisen

3.1 Functionele eisen

Voor het ontwerp van buigslappe voegen gelden de volgende functionele eisen:

- de buigslappe voeg, inclusief aansluitingen, moet voldoende sterk zijn (statische sterkte en vermoeiingssterkte) om de verkeersbelasting op de voeg gedurende een ontwerplevensduur van 50 jaar te kunnen dragen;
- de buigslappe voeg, inclusief aansluitingen, moet in staat zijn om de belastingen te dragen en de opgelegde vervormingen vanuit aangrenzende brugdekken te volgen zonder dat ontoelaatbare scheurvorming ontstaat;
- de buigslappe voeg moet water keren.

3.2 Verificatiemethoden

Indien de buigslappe voeg wordt ontworpen en berekend volgens de eisen en regels in de Eurocodes en de aanvullingen daarop in de ROK, in combinatie met de navolgende ontwerpisen, mag worden verondersteld dat wordt voldaan aan de hiervoor beschreven functionele eisen.

Binnen het bijbehorende toepassingsgebied mogen de standaarddetails volgens hoofdstuk 4 worden toegepast. Een berekening is dan niet noodzakelijk.

3.3 Ontwerpeisen

Voor het ontwerp en de berekening van buigslappe voegen gelden de regels volgens de relevante delen uit de Eurocode reeks. Navolgend zijn enkele uitgangspunten en aanvullende of afwijkende eisen gegeven.

Toelichting:

Voor nadere informatie over de verschillende aspecten die een rol spelen bij het ontwerp en de berekening wordt verwezen naar hoofdstuk 5.

Bij het ontwerp en de berekening van buigslappe voegen moeten de volgende uitgangspunten worden aangehouden:

- gevolgklasse CC2;
- ontwerplevensduur 50 jaar.

De bovenzijde van buigslappe voegen moet over de lengte van de voegwapening vermeerderd met 200 mm worden voorzien van een strook bitumenafdichtingspasta Plastikol® UDM 2S (of gelijkwaardig) om water te keren. Vanwege de beschermende werking van deze strook geldt:

- een versoepeling van de maximale scheurwijdte tot $w_{\max} = 0,4$ mm;
- een reductie van 5 mm voor de betondekking op de bovenwapening.

In het Beheer- en Onderhoudsplan moet worden opgenomen dat deze bescherming bij vervanging van het asfalt opnieuw moet worden aangebracht.

Toelichting:

In de navolgende tabel is een voorbeeld voor de bepaling van de nominale betondekking c_{nom} gegeven.

	bovenzijde	onderzijde
milieuklasse	XD3	XC3
ontwerplevensduur	50 jaar	50 jaar
bepaling constructieklasse:		
<i>basis constructieklasse</i>	S4	S4
<i>ontwerplevensduur 100 jaar</i>		
<i>sterkteklasse \geq C45/55 (XD3)</i>		-1
<i>sterkteklasse \geq C35/45 (XC3)</i>		-1
<i>plaatgeometrie*</i>	-1	-1
<i>kwaliteitsbeheersing**</i>		
<i>resulterende constructieklasse</i>	S3	S2
reductie bitumineuze afdichting	-5	
toeslag niet inspecteerbaar*	+5 mm	+5 mm
toeslag onbekist*	+5 mm	
minimale dekking C_{min}	30 + 5 + 5 = 40 mm	15 + 5 = 20 mm
uitvoeringstolerantie Δc_{dev}	10 mm	10 mm
nominale dekking C_{nom}	50 mm	30 mm

* zie de ROK, aanvullingen bij NEN-EN 1992-1-1, 4.4.1.2 (5).

** volgens de ROK mag de reductie in verband met kwaliteitsbeheersing alleen in rekening worden gebracht bij prefab.

3.4 Uitvoeringseisen

Er mogen vanuit het oogpunt van vermoeiing geen (hecht)lassen worden toegepast voor het samenstellen van de voegwapening.

Voor buigslappe voegen zijn verder geen specifieke aanvullingen van toepassing op NEN-EN 13670 en de aanvullingen daarop in de ROK.

Voor de toleranties geldt tolerantieklasse 2 volgens NEN-EN 13670.

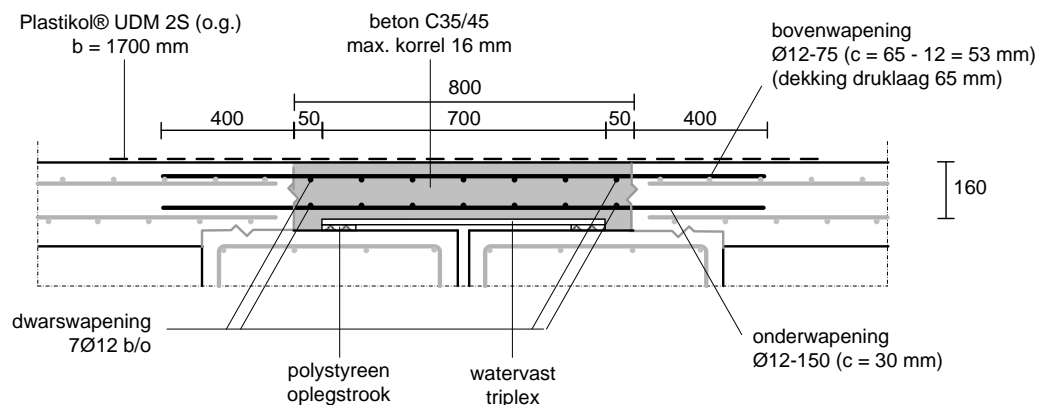
4 Standaarddetails

4.1 Toepassingsgebied

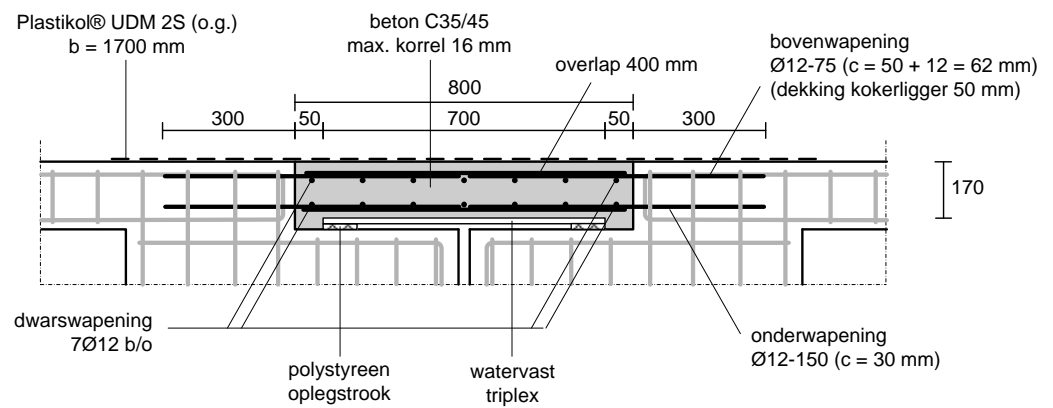
De standaarddetails mogen onder de volgende voorwaarden worden toegepast:

- brugdekken opgebouwd uit railbalken met druklaag of uit kokerliggers, beide opgelegd op gewapende rubber oplegblokken.
- buigslappe voegen die aan één zijde zijn ingeklemd in bijvoorbeeld een pijlertafel vallen niet binnen het toepassingsgebied;
- kruisingshoek $60^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ$, waarbij α de hoek is tussen de as van de ondersteuning en de richting van de prefab liggers. De langswapening ligt in de richting van de liggers en de voegoverspanning geldt loodrecht op de oplegging;
- constructiehoogte:
 - $h \geq 1/26 L$ voor railbalken met druklaag;
 - $h \geq 1/32 L$ voor kokerliggers;
- betonsterkteklasse prefab $\geq C55/67$;
- ongedilateerde lengte ≤ 150 m;
- brugbreedte ≥ 9 m;
- asfaldikte ≥ 120 mm (ter plaatse van voeg);
- hoogteligging voegwapening conform details.

4.2 Brugdekken uit railbalken met druklaag



4.3 Brugdekken uit kokerliggers



5 Aanwijzingen voor het ontwerp en de berekening

5.1 Algemeen

Buiten het toepassingsgebied van de standaarddetails moet de opdrachtnemer een nieuw voegontwerp maken en toetsen aan de geldende eisen. In dit hoofdstuk zijn aanwijzingen gegeven voor het ontwerp en de berekening.

Door Rijkswaterstaat is ten behoeve van de ontwikkeling van de standaarddetails een rekensheet in het computerprogramma Mathcad® ontwikkeld. Een afdruk van de rekensheets voor de standaarddetails met railbalken en met kokerliggers is opgenomen in bijlage A. Deze afdruk kan als voorbeeld worden gebruikt voor de berekening van buigslappe voegen buiten het toepassingsgebied van de standaarddetails.

Om te komen tot een voegontwerp dat voldoet aan de eisen, zijn veelal iteratieve berekeningen noodzakelijk. Daarbij wordt gevarieerd met de voegdikte, de voegoverspanning, de hoeveelheid wapening en zo nodig de betonsterkteklasse. De volgende aspecten zijn meestal bepalend voor het ontwerp:

- de dwarskrachtcapaciteit moet voldoende zijn om de belasting door wielprenten af te dragen. Deze eis geeft, in combinatie met de detailleringsregels met betrekking tot de minimale verticale afstand tussen het boven- en ondernet, een ondergrens voor de voegdikte;
- de voeg moet voldoende buigslap zijn om de momenten door opgelegde vervormingen vanuit de aangrenzende brugdekken, en daarmee de staalspanning (van belang voor vermoeiing en scheurwijdte), in voldoende mate te beperken. De voeg kan buigslapper worden gemaakt door de voegoverspanning te vergroten en door de voegdikte te minimaliseren.

Het verhogen van de betonsterkteklasse kan in sommige gevallen zinvol zijn om de voegdikte en daarmee de buigstijfheid van de voeg te beperken. Daarbij moet worden bedacht dat het effect beperkt is, omdat een hogere sterkteklasse anderzijds ook leidt tot een toename van de stijfheid.

In dit hoofdstuk is achtereenvolgens ingegaan op:

- paragraaf 5.2: de rekenmethodiek voor buigslappe voegen
- paragraaf 5.3: de belastingsgevallen
- paragraaf 5.4: de belastingscombinaties
- paragraaf 5.5: het berekenen van momenten en spanningen in de voeg
- paragraaf 5.6: resultaten van een parameterstudie, die is uitgevoerd ten behoeve van de ontwikkeling van de standaarddetails
- paragraaf 5.7: scheve kruisingen

Het rekenvoorbeeld in bijlage A sluit aan bij de uitgangspunten en aanwijzingen die in dit hoofdstuk zijn gegeven en kan daarmee in samenhang worden gelezen.

5.2 Rekenmethodiek

Buigslappe voegen worden toegepast tussen prefab brugdekken die vrij opgelegd (statisch bepaald) zijn ontworpen. De buigende momenten en de dwarskrachten in het brugdek worden niet noemenswaardig beïnvloed door de aanwezigheid van de buigslappe voegen, omdat de buigstijfheid van de voeg slechts een fractie bedraagt van de buigstijfheid van het brugdek. Enerzijds is namelijk de hoogte veel kleiner en

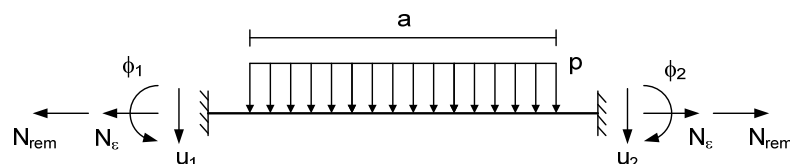
anderzijds kan de voeg gescheurd worden verondersteld, terwijl de voorgespannen liggers in de praktijk ongescheurd zullen zijn. Het beschreven gedrag betekent eveneens dat de buigslappe voeg de opgelegde hoekverdraaiingen vanuit de aansluitende velden niet of nauwelijks zal verhinderen. Voor het ontwerp wordt daarom verondersteld dat de voeg deze hoekverdraaiingen volledig moet volgen. Voor de beperkte verticale opgelegde verplaatsingen, die ontstaan door indrukking van de oplegblokken, geldt dat deze ook nauwelijks worden verhinderd door de voeg en volledig worden gevolgd. Opgelegde horizontale verplaatsingen door lengteveranderingen van het brugdek worden wel verhinderd door de buigslappe voeg c.q. doorgegeven.

De buigslappe voeg wordt onderworpen aan:

1. Verkeersbelasting op de voeg;
2. Normaalkracht door rembelasting;
3. Opgelegde vervormingen vanuit de aansluitende velden.

De belasting door het eigen gewicht van de voeg en het daarop aanwezige asfalt kunnen worden verwaarloosd.

Vanwege de relatief kleine overspanning kan de belasting door wielprenten op de voeg worden geschematiseerd tot een gelijkmatig verdeelde belasting. De buigslappe voeg kan daarom worden geschematiseerd als een ligger, die is ingeklemd in de aansluitende velden. Het model met de beschreven belastingen en opgelegde vervormingen is weergegeven in figuur 3.



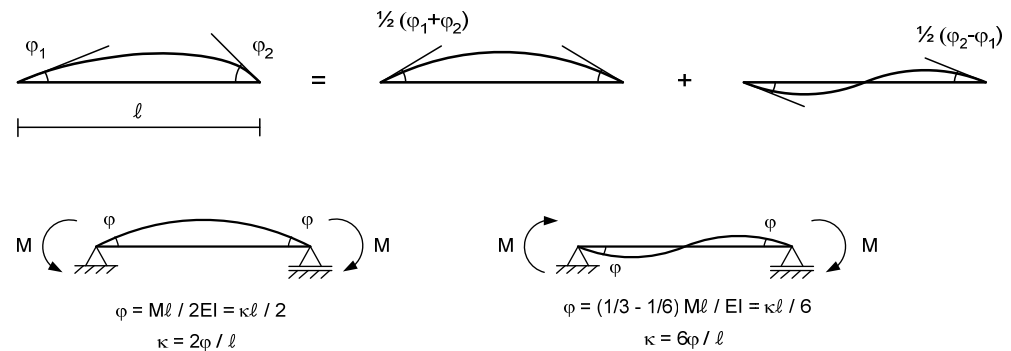
- p = gelijkmatig verdeelde belasting door wielprenten over afstand a
 N_{rem} = normaalkracht door rembelasting
 N_e = normaalkracht door verhinderde lengteveranderingen van de brug
 ϕ_i = opgelegde hoekverdraaiing vanuit brugdek i
 u_i = opgelegde verticale verplaatsing vanuit brugdek i

Figuur 3: Model met belastingen en opgelegde vervormingen

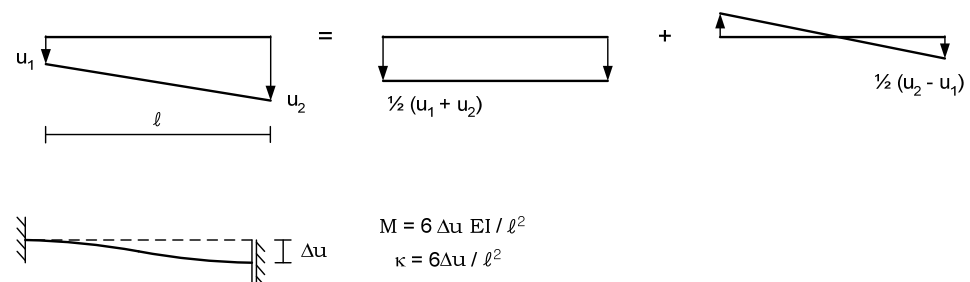
In de rekenvoorbeelden in bijlage A is alleen de bovenwapening ter plaatse van de maatgevende steunpuntsdoorsnede bij de inklemming beschouwd, waar een negatief moment optreedt. Het positieve buigende moment in het veld voor de onderwapening is, zowel door de gelijkmatig verdeelde belasting als door de opgelegde vervormingen, maximaal de helft van het steunpuntsmoment. Vanuit praktisch oogpunt is gekozen voor een onderwapening die gelijk is aan de helft van de bovenwapening. Berekeningen voor de onderwapening zijn dan niet nodig.

De opgelegde hoekverdraaiingen en verticale verplaatsingen kunnen worden vertaald naar opgelegde krommingen in de maatgevende steunpuntsdoorsnede. Met een doorsnede-berekening kunnen vervolgens bij deze opgelegde kromming, na ook het effect van de belastingen door wielprenten in rekening te hebben gebracht, de spanningen in de wapening en in het beton worden bepaald. De opgelegde krommingen ter plaatse van de inklemming waar negatieve buiging optreedt, kunnen worden bepaald met de volgende formules, zie ook figuur 4 en figuur 5:

door hoekverdraaiingen $\kappa = 4\varphi_1 - 2\varphi_2 / L$ (linker inklemming)
 door verticale verplaatsingen $\kappa = 6\Delta u / L^2$ (linker inklemming)



Figuur 4: Krommingen door opgelegde hoekverdraaiingen



Figuur 5: Kromming door opgelegde verschilverplaatsing

Hoekverdraaiingen treden op als gevolg van een kromming van het brugdek door kruip, rustende belasting, verkeersbelasting en een temperatuurgradiënt. Verschilverplaatsingen treden op door een (verschil)indrukking van oplegblokken door rustende belasting en verkeersbelasting.

Uit verschillende beschouwingen is gebleken dat de invloed van een verschilverplaatsing Δu zeer beperkt is ($< 10\%$). En belangrijker nog, het moment dat daardoor ontstaat in de maatgevende steunpuntdoorsnede bij de inklemming is tegengesteld aan het moment door de opgelegde hoekverdraaiingen en werkt daarom gunstig. Aangezien de invloed erg beperkt is en een verschilverplaatsing bovendien gunstig werkt, is deze invloed buiten beschouwing gelaten in de rekenvoorbeelden in bijlage A.

Navolgend is ingegaan op de toetsingen in de verschillende grenstoestanden en de aspecten die daarbij een rol spelen.

Uiterste grenstoestand - Sterkte

De volgende toetsen moeten worden uitgevoerd bij de fundamentele combinatie:

Buiging	toets 1	$M_{Ed} \leq M_{Rd}$	NEN-EN 1992-1-1, 6.1
	toets 2	$x_u \leq (500/500+f) \cdot d$	NEN-EN 1992-1-1/NB, 6.1(9)
Dwarskracht	toets 3	$V_{Ed} \leq V_{Rd,c}$	NEN-EN 1992-1-1, 6.2
	toets 4	$V_{Ed} \leq V_{Rd,max}$	NEN-EN 1992-1-1, 6.2

Uit NEN-EN 1992-1-1, art. 2.3.1.2, 2.3.1.3 en 2.3.2.2 volgt dat opgelegde vervormingen bij de toets van de statische sterkte buiten beschouwing mogen worden gelaten, mits voldoende ductiliteit aanwezig is. In overeenstemming met de ROK mag worden verondersteld dat de ductiliteit van buigslappe voegen voldoende is, vanwege de eis met betrekking tot de betondrukzonehoogte. Om de benodigde ductiliteit te verzekeren, moet de drukzonehoogte x_u worden getoetst bij de toegepaste wapening en niet bij de benodigde wapening voor sterkte, zoals normaliter is toegestaan volgens NEN-EN 1992-1-1/NB, art. 6.1.

Voor de dwarskrachttoets mag volgens NEN-EN 1992-1-1/NB, art. 6.2.2 de invloed van een trekkracht ten gevolge van opgelegde vervormingen door krimp en temperatuursveranderingen kleiner dan 40K worden verwaarloosd. In de buigslappe voeg treedt niet alleen een trekkracht op door krimp en een temperatuursdaling, maar ook door de kruipverkorting van de prefab liggers en de verhindering daarvan door de oplegblokken. De Nationale Bijlage geeft voor deze opgelegde vervorming geen grenzen aan. Desalniettemin kan worden gesteld dat ook deze opgelegde vervorming voor de dwarskrachttoets buiten beschouwing kan worden gelaten, omdat alle opgelegde vervormingen samen (inclusief kruip) kleiner zullen zijn dan de grens volgens de norm. De verhindering door de oplegblokken is immers redelijk beperkt en kleiner dan de verhindering bij veel andere betonconstructies. Ook is de krimp van de prefab liggers kleiner dan betonconstructies in bijvoorbeeld binnenklimaat. Een belangrijke randvoorwaarde is wel dat lengteveranderingen alleen worden verhinderd door gewapend rubber oplegblokken. Er zal daarom altijd bij ten minste één voegovergang geen sprake kunnen zijn van een buigslappe voeg, maar van een voeg waar lengteveranderingen ongehinderd kunnen optreden, omdat anders de mate van verhindering veel groter wordt.

Resumerend geldt dat opgelegde vervormingen onder de gegeven randvoorwaarden alleen bij de toets van de scheurwijdte en de vermoeiingstoets in rekening hoeven te worden gebracht.

Bij de dwarskrachttoets mag gebruik worden gemaakt van een reductie vanwege directe afdracht, overeenkomstig NEN-EN 1992-1-1, art. 6.2.2 (6). De dwarskracht (toets 3) mag daarbij worden getoetst op een afstand d van de oplegging, overeenkomstig NEN-EN 1992-1-1, art. 6.2.1 (8), omdat sprake is van een gelijkmatig verdeelde belasting. Bezwijken van de drukdiagonaal (toets 4) moet wel worden getoetst bij de oplegging.

Bruikbaarheidsgrenstoestand – Scheurwijdte

De volgende toetsen moeten worden uitgevoerd:

Maximale staalspanning	toets 5	$\sigma_s \leq k_4 f_{yk}$	NEN-EN 1992-1-1, 7.2
Scheurwijdte	toets 6	$w_k \leq k_x w_{max}$	NEN-EN 1992-1-1, 7.3.4

De maximale staalspanning moet worden getoetst bij de karakteristieke belastingscombinatie en de scheurwijdte bij de frequente belastingscombinatie.

Het grootste gedeelte van de staalspanning σ_s wordt bepaald door de opgelegde hoekverdraaiing vanuit de aansluitende velden en in mindere mate door de verkeersbelasting op de voeg. Om deze reden is, in overeenstemming met hetgeen is voorgeschreven in NEN-EN 1992-1-1, 7.2, voor toets 5 uitgegaan van de grenswaarde $k_4 f_{yk}$ (opgelegde vervorming) en niet van $k_3 f_{yk}$ (opgelegde belasting).

De aanbevolen waarden voor k_3 en k_4 zijn respectievelijk 0,8 en 1,0. In de Nationale Bijlage zijn beide waarden echter op 0,0 gesteld. Uit navraag bij de normcommissie

die de Nationale Bijlage heeft opgesteld, blijkt dat de waarden op nul zijn gesteld, omdat de normcommissie wil voorkomen dat alleen deze toets wordt uitgevoerd en een verdere scheurwijdte toets achterwege wordt gelaten. Voor de buigslappe voeg wordt de scheurwijdte echter afzonderlijk getoetst met toets 6. Aanvullend wordt toets 5 van de staalspanning uitgevoerd, waarbij is uitgegaan van de aanbevolen waarde $k_4 = 1,0$. Met andere woorden, de staalspanning bij de karakteristieke combinatie (inclusief opgelegde vervormingen) wordt beperkt tot 500 MPa.

Uiterste grenstoestand – Vermoeiing

Bij de vermoeiingstoets moeten, in tegenstelling tot bij de toets van de statische sterkte, de opgelegde vervormingen vanuit de aansluitende velden door de verkeersbelasting wel worden meegenomen, omdat deze leiden tot spanningswisselingen in het betonstaal die aanleiding geven tot vermoeiingsschade.

Voor de vermoeiingstoets wordt aanbevolen om gebruik te maken van het belastingsmodel FLM4b met de aanpassingen daarvan in ROK 1.3, omdat het eenvoudige belastingsmodel FLM1 zou leiden tot meer benodigde wapening.

Vermoeiing betonstaal	toets 7	$\sum n_i/N_i \leq 1$	NEN-EN 1992-1-1, 6.8
Vermoeiing beton	toets 8	$\sum \frac{n_i}{N_i} \leq 1$	NEN-EN 1992-2, 6.8.7

Spanningswisselingen in het betonstaal en in het beton worden veroorzaakt door voertuigpassages in de aansluitende velden en door aslasten op de voeg zelf. Bij kleinere overspanningen en relatief lange voertuigen kunnen beide wisselingen tegelijk optreden, waardoor ze bij elkaar opgeteld zouden moeten worden. Aanvullend onderzoek heeft echter uitgewezen dat deze optelling niet noodzakelijk is, vanwege diverse gunstige effecten die niet zijn meegenomen in de vermoeiingsberekeningen. De genoemde spanningswisselingen kunnen dus afzonderlijk in rekening worden gebracht.

5.3

Belastingsgevallen

De volgende belastingsgevallen kunnen worden onderscheiden:

BG 1 Verkeersbelasting

BG 2 Normaaltrekkracht door rembelasting

BG 3 Opgelegde vervormingen:

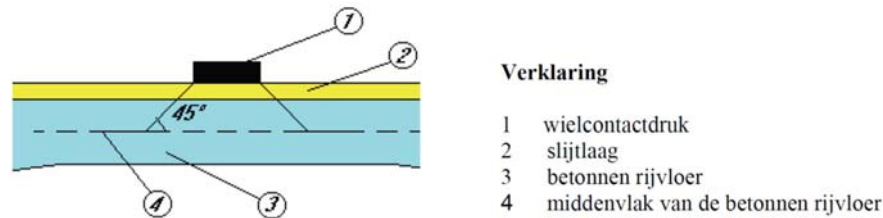
- a) hoekverdraaiingen door kruip
- b) hoekverdraaiingen door rustende belasting
- c) hoekverdraaiingen door verkeer configuratie 1
- d) hoekverdraaiingen door verkeer configuratie 2
- e) hoekverdraaiingen door temperatuurgradiënt
- f) normaaltrekkracht door verkorting brugdek

Hierna is nader ingegaan op de afzonderlijke belastingsgevallen en daarna zijn de relevante belastingscombinaties gegeven.

BG 1: Verkeersbelasting

De verkeersbelasting op de voeg bestaat uit een gelijkmatig verdeelde belasting (UDL) en uit wielprenten van de tandemstelsels (TS). De gelijkmatige verdeelde belasting (UDL) hoeft volgens RTD 1007-2 niet te worden meegenomen. De wielprenten kunnen worden vertaald naar een gelijkmatig verdeelde belasting, waarbij de geconcentreerde belastingen worden gespreid volgens NEN-EN 1991-2, zie figuur 6. Momenten en dwarskrachten kunnen vervolgens eenvoudig worden

bepaald met het eerder besproken liggermodel van de voeg. Verdere uitwerking is opgenomen in het rekenvoorbeeld in bijlage A.



Figuur 6: Spreiding van geconcentreerde belasting volgens NEN-EN 1991-2

BG 2: Normaaltrekkracht door rembelasting

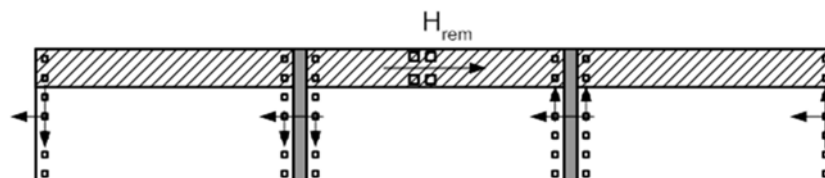
Een rembelasting kan, afhankelijk van de positie op het brugdek, zorgen voor een normaaltrekkracht in de buigslappe voeg. De voorgeschreven rembelasting volgens NEN-EN 1991-2, 4.4.1 is:

$$H_{rem} = 0,6 \alpha_{Q1} (2 Q_{1k}) + 0,10 \alpha_{q1} q_{1k} w_1 L \quad \text{waarbij } 180 \alpha_{Q1} \leq H_{rem} \leq 800 \text{ kN}$$

waarin:

- H_{rem} karakteristieke waarde van de rembelasting
- α_{Q1}, α_{q1} correctiefactoren
- Q_{1k} aslast tandemstelsel TS1
- q_{1k} gelijkmatig verdeelde verkeersbelasting rijstrook 1
- w_1 breedte rijstrook 1
- L lengte van het brugdek of het beschouwde deel

Uit de formule volgt dat de rembelasting wordt veroorzaakt door het zwaarste tandemstelsel TS1 en door de verzwaarde rijstrookbelasting. Voor de afdracht van de rembelasting geldt dat het brugdek als schijf fungeert en dat de rembelasting wordt verdeeld over de oplegblokken naar rato van horizontale stijfheid. Aangezien de totale (ongedilateerde) lengte van een brugdek over het algemeen langer is dan de brugbreedte, wordt aangenomen dat een excentriciteit wordt opgenomen door reactiekrachten loodrecht op de brugas. In figuur 7 is de afdracht van de rembelasting schematisch weergegeven voor een brug met drie gelijke overspanningen, waarbij alle oplegblokken een gelijke horizontale stijfheid hebben.



Figuur 7: Mogelijke afdracht rembelasting bij 3 gelijke velden

Op basis van de beschreven afdracht kan de (maatgevende) normaaltrekkracht in de buigslappe voeg worden berekend. De normaaltrekkracht door de verzwaarde rijstrookbelasting kan gelijkmatig worden verdeeld over de gehele voeglengte, oftewel de brugbreedte. Voor de normaaltrekkracht door het tandemstelsel is het rekenen met de gehele brugbreedte te gunstig in situaties waarbij vlakbij of direct op een buigslappe voeg wordt geremd, omdat de rembelasting moet worden ingeleid in de schijf. Voor die situaties kan bijvoorbeeld een meewerkende breedte van 4 m worden verondersteld.

De maatgevende voeg met de grootste normaaltrekkkracht door de rembelasting zal veelal de eerste of de tweede buigslappe voeg vanuit het landhoofd zijn. Daarbij geldt dat de normaaltrekkkracht groter wordt naarmate het aantal overspanningen toeneemt, omdat dan een groter aandeel van de rembelasting door de buigslappe voeg naar de oplegblokken aan de andere zijde van de voeg moet worden afgedragen. Uitwerking van de rembelasting geeft:

$$N_{rem} = 0,6 \cdot 1,0 \cdot 2 \cdot 300 + 0,10 \cdot 1,15 \cdot 9,0 \cdot 3,0 \cdot L = 360 + 3,11 L \text{ [kN]} \leq 800 \text{ [kN]}$$

De bovengrens van 800 kN hoort bij een beschouwde lengte van circa 150 m. Voor de buigslappe voeg is deze bovengrens niet van belang, omdat deze lengte veel groter is dan de som van de overspanningen van de eerste velden. Bij gelijke overspanningen en gelijke horizontale stijfheden van de oplegblokken kan de normaaltrekkkracht N_{rem} in voegnummer i als volgt worden bepaald:

$$N_{rem}(i) = \left(\frac{360}{4} + \frac{i \cdot 3,11 \cdot L}{b} \right) \cdot \left(\frac{n_o - i}{n_o} \right)$$

waarin:

N_{rem} normaaltrekkkracht in buigslappe voeg in [kN/m]

i voegnummer (1, 2, etc.)

L overspanning per veld in [m]

n_o aantal overspanningen

b brugdekbreedte in [m]

In gevallen waarvoor de formule niet geschikt is, namelijk bij ongelijke overspanningen en/of verschillende oplegblokken, zal de normaaltrekkkracht met bijvoorbeeld een schijfberekening met veren moeten worden bepaald of kan worden uitgegaan van een bovengrens van:

$$N_{rem} = \left(\frac{360}{4} + \frac{3,11 \cdot \frac{1}{4} L_{brug}}{b} \right)$$

Deze bovengrens is gebaseerd op een groot aantal overspanningen. De achtergrond van de tweede term is dat de helft van de bruglengte is belast door een rembelasting door UDL. De helft van deze rembelasting wordt als normaaltrekkkracht door de middelste voeg overgedragen. Deze normaalkracht komt overeen met een belaste lengte van $\frac{1}{4} L_{brug}$. Daarbij kan nog worden opgemerkt dat dit een veilige aanname is, omdat voor de middelste voeg geldt dat de eerste term te groot is.

BG 3: Opgelegde vervormingen

In algemene zin geldt dat opgelegde hoekverdraaiingen veelal kunnen worden ontleend aan de berekening van de oplegblokken en/of de liggerberekeningen c.q. plaatberekeningen van het brugdek. Hierna zijn enkele aanvullende aanwijzingen bij de verschillende opgelegde vervormingen gegeven.

a. kruip

De hoekverdraaiingen door kruipvervormingen onder permanente belasting (eigen gewicht, rustende belasting en voorspanning) volgen uit de liggerberekeningen. De hoekverdraaiingen mogen vanwege het langdurende karakter worden vermenigvuldigd met een relaxatiecoëfficiënt:

$$k_{\varphi} = \frac{1 - e^{-\varphi}}{\varphi}$$

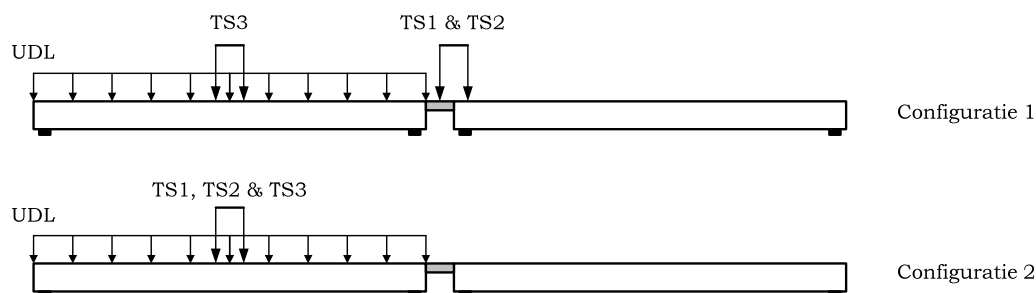
De hoekverdraaiingen door kruip zullen veelal relatief beperkt of verwaarloosbaar zijn ten opzichte van bijvoorbeeld de hoekverdraaiing door verkeersbelasting.

b. rustende belasting

De rustende belasting wordt na de realisatie van de buigslappe voeg aangebracht en leidt daarom tot opgelegde hoekverdraaiingen. Ter vereenvoudiging kunnen de direct optredende hoekverdraaiingen φ_1 en φ_2 veelal worden berekend met een gemiddelde asfaltbelasting van 150 mm en kan de overige rustende belasting worden verwaarloosd.

c en d. hoekverdraaiingen door verkeer configuraties 1 en 2

Voor negatieve buiging zijn twee mogelijk maatgevende configuraties voor de verkeersbelasting van belang, zie figuur 8. Configuratie 1 geeft het maximale moment en de maximale dwarskracht door wielprenten op de voeg. Het tandemstelsel TS3 is daarbij in het veld geplaatst, omdat dit laststelsel bij plaatsing op de voeg zich buiten het invloedsgebied van het maximale moment en de maximale dwarskracht zou bevinden. Configuratie 2 geeft het maximale negatieve moment door de opgelegde hoekverdraaiing vanuit het aansluitende veld.



Figuur 8: Mogelijk maatgevende configuraties

Configuratie 1 is veelal maatgevend voor de statische sterkte (UGT) en configuratie 2 voor scheurwijdte (BGT).

Bij de vermoeiingstoets is belastingsmodel 4b voor vermoeiing beschouwd. Het betonstaal is getoetst met de schaderegel van Miner. Daarbij geldt dat zowel passerend verkeer op de voeg als in de aansluitende velden leidt tot spanningswisselingen in de bovenwapening. Alleen het veld met de grootste hoekverdraaiing is van belang, omdat een wagen in het andere veld leidt tot een (beperkte) drukspanning in bovenwapening in dezelfde doorsnede.

In het rekenvoorbeeld in bijlage A worden de hoekverdraaiingen door de verschillende wagen in FLM4b afgeleid uit de hoekverdraaiing door het zwaarste tandemstelsel TS1. Met andere woorden, de hoekverdraaiing door TS1 in de rijstrook voor zwaar verkeer is een invoerparameter. Daarbij kan het tandemstelsel eenvoudigheidshalve in het midden van de overspanning worden geplaatst, omdat een positie dicht bij de oplegging slechts een beperkt grotere hoekverdraaiing geeft (3%). Vervolgens wordt een fictieve (ligger)buigstijfheid berekend met:

$$EI = \frac{Pl^2}{16\varphi}$$

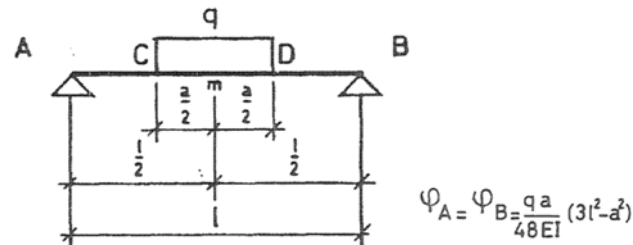
waarbij

$$P = 2 \times 300 = 600 \text{ kN}$$

$$L = \text{de overspanning van het brugdek}$$

$$\varphi = \text{hoekverdraaiing door TS1}$$

Met deze fictieve buigstijfheid kan de hoekverdraaiing door andere wagens worden berekend met de formule in figuur 9. De wagens worden daarbij vereenvoudigd tot een bloklast.



Figuur 9: Hoekverdraaiing door bloklast in het veldmidden

Bij de gekozen methode wordt voor de wagens in FLM4b impliciet dezelfde spreidingsbreedte aangehouden als voor het tandemstelsel TS1. In een situatie met assen dicht bij de oplegging (bij kleinere overspanningen) is deze aanname iets te gunstig. Deze assen leveren echter een beperkte bijdrage aan de hoekverdraaiing en bovendien wordt de meewerkende breedte begrensd door de nabijgelegen brugrand. De gekozen aanpak is geverifieerd met plaatberekeningen en daaruit blijkt dat de foutmarge acceptabel is (< 10%).

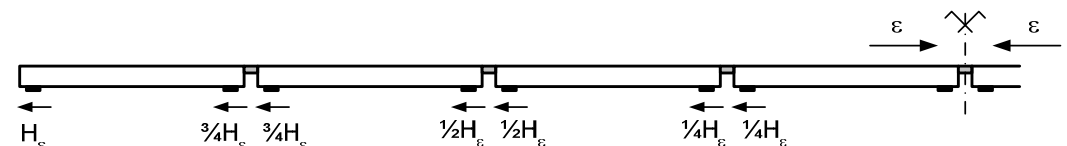
e. hoekverdraaiingen door temperatuurgradiënt

Voor de bovenwapening is alleen een afkoeling van de bovenzijde van het brugdek van belang, omdat dit leidt tot een trekspanning. Verder gelden geen aanvullende aanwijzingen voor dit belastingsgeval.

f. normaaltrekkracht door verkorting van het brugdek

Een verkorting van het brugdek wordt verhinderd door de oplegblokken en leidt daardoor tot een normaaltrekkracht in de buigslappe voegen. Een verkorting wordt veroorzaakt door krimp, kruip (voorspanning) en een temperatuursdaling. Ook hoekverdraaiingen leiden tot een verkorting, omdat het rotatiepunt ter hoogte van de buigslappe voeg ligt en niet ter hoogte van het zwaartepunt van het brugdek.

De grootte van de normaaltrekkracht is afhankelijk van de grootte van de verkorting en van de horizontale stijfheid van de oplegblokken. De horizontale oplegreacties nemen toe naar de uiteinden van de brug, omdat daar de horizontale verplaatsing het grootst is. In figuur 10 zijn de oplegreacties gegeven voor een brug met gelijke overspanningen en gelijke oplegblokken.



Figuur 10: Horizontale oplegreacties door verkorting

De normaaltrekkracht per meter voeg is maximaal gelijk aan (middelste voeg):

$$N_\epsilon = \frac{1}{2} n_o \frac{H_\epsilon}{b_w}$$

waarin:

- N_ϵ maximale normaaltrekkracht per meter voegbreedte
- n_o aantal overspanningen
- H_ϵ horizontale kracht per oplegblok aan de uiteinden van de brug

b_w werkende breedte van een prefab ligger

De horizontale kracht H_e kan veelal worden afgeleid uit de ontwerpberekening van de oplegblokken. Als alternatief kan deze kracht worden bepaald op basis van de maximaal toelaatbare horizontale kracht op het toegepaste type oplegblok.

Voor afwijkende situaties (ongelijke velden en/of ongelijke oplegblokken) kan de maximale trekkracht in de buigslappe voeg ook veelal worden afgeleid uit de ontwerpberekening van de oplegblokken.

Tot slot wordt opgemerkt dat het niet nodig is om de normaaltrekkracht door verkorting zeer nauwkeurig te bepalen, omdat de invloed redelijk beperkt is.

5.4

Belastingscombinaties

Navolgend zijn de belastingscombinaties voor sterkte, scheurwijdte en vermoeiing gegeven. De belastingscombinaties zijn ontleend aan NEN-EN 1990, hoofdstuk 6 en de momentaanfactoren aan NEN-EN 1991-2/NB, Tabel NB.9. In de belastingscombinaties is de verkeersbelasting dominant ten opzichte van de temperatuursbelasting. Binnen de verkeersbelasting is de verticale belasting dominant ten opzichte van de rembelasting. Voor de rembelasting geldt in dat geval een factor 0,8 in overeenstemming met NEN-EN 1991-2/NB, Tabel NB.3.

Uiterste grenstoestand – Sterkte

Fundamentele combinatie, groep 1a:

NEN-EN 1990 vgl. (6.10a) $\gamma_G G + \gamma_Q \psi_0 (Q_{\text{verkeer}} + 0,8 Q_{\text{rem}})$ niet maatgevend

NEN-EN 1990 vgl. (6.10b) $\gamma_G G + \gamma_Q (Q_{\text{verkeer}} + 0,8 Q_{\text{rem}})$ maatgevend

Uitwerking van combinatie 6.10b bij gevolgklasse 2 geeft:

$$1,35 \cdot BG1 + 1,35 \cdot 0,8 \cdot BG2$$

Bruikbaarheidsgrenstoestand – Scheurwijdte

Karakteristieke combinatie (staalspanning):

NEN-EN 1990 vgl. (6.14b) $G + (Q_{\text{verkeer}} + 0,8 Q_{\text{rem}}) + \psi_0 Q_{\text{temp}}$

Uitwerking geeft:

configuratie 1 $BG1 + 0,8 \cdot BG2 + BG3a + BG3b + BG3c + 0,3 \cdot BG3e + BG3f$

configuratie 2 $0,8 \cdot BG2 + BG3a + BG3b + BG3d + 0,3 \cdot BG3e + BG3f$

Frequente combinatie (scheurwijdte):

NEN-EN 1990 vgl. (6.15b) $G + \psi_1 (Q_{\text{verkeer}} + 0,8 Q_{\text{rem}}) + \psi_2 Q_{\text{temp}}$

Uitwerking geeft:

configuratie 1

$0,8 \cdot BG1 + 0,8 \cdot 0,8 \cdot BG2 + BG3a + BG3b + 0,8 \cdot BG3c + 0,3 \cdot BG3e + BG3f$

configuratie 2

$0,8 \cdot 0,8 \cdot BG2 + BG3a + BG3b + 0,8 \cdot BG3d + 0,3 \cdot BG3e + BG3f$

Uiterste grenstoestand – Vermoeiing

Voor vermoeiing geldt de belastingscombinatie volgens NEN-EN 1992-1-1, 6.8.3. Voor vermoeiing is alleen de (wisselende) verticale verkeersbelasting Q_{fat} volgens belastingsmodel FLM4b op de voeg en in de aansluitende velden van belang. Hierbij geldt een belastingsfactor $\gamma_{F,\text{fat}} = 1,0$. Bij de vermoeiingstoets moet rekening worden gehouden met het feit dat de passage van een laststelsel tot meerdere wisselingen

leidt, namelijk bij passage in een aansluitend veld en meerdere malen bij passage van de voeg (wisseling per as).

De belastingscombinaties voor sterkte en scheurwijdte zijn samengevat in tabel 1.

Tabel 1: Belastingscombinaties (UGT & BGT)

	Belastingscombinatie				
	fundamenteel (UGT)	karakteristiek (BGT)		frequent (BGT)	
		config 1	config 2	config 1	config 2
BG1, verkeer op de voeg	1,35	1		0,8	
BG2, rembelasting	$1,35 \cdot 0,8$	0,8	0,8	$0,8 \cdot 0,8$	$0,8 \cdot 0,8$
BG3a, kruip		1	1	1	1
BG3b, rustende belasting		1	1	1	1
BG3c, verkeer in veld (1)		1		0,8	
BG3d, verkeer in veld (2)			1		0,8
BG3e, temperatuur		0,3	0,3	0,3	0,3
BG3f, verkorting		1	1	1	1

5.5

Berekeningen van momenten en staalspanningen

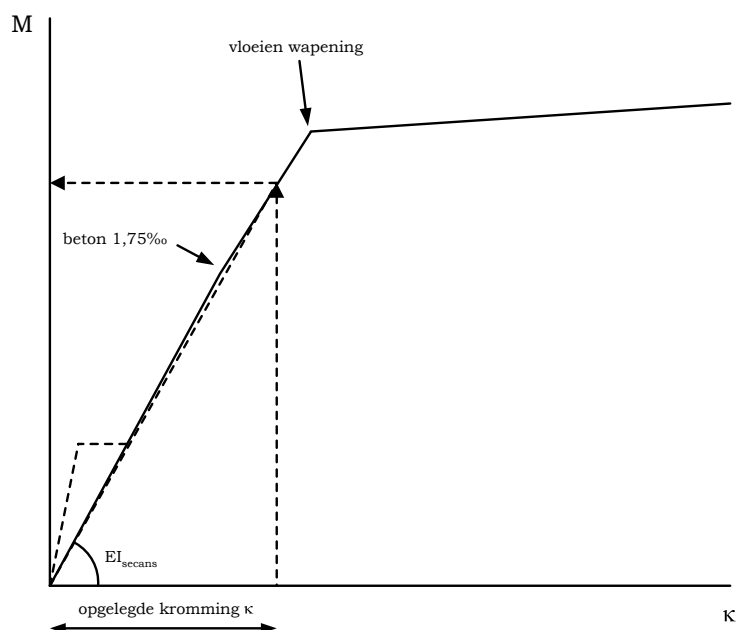
In het rekenvoorbeeld in bijlage A wordt gebruik gemaakt van momenten- en normaalkrachtevenwicht ($\Sigma M = 0$ en $\Sigma N = 0$) om de staalspanning te berekenen bij een bekend moment en een bekende normaal(trek)kracht.

De normaaltrekkrachten door de rembelasting en door verkorting volgen uit de eerder gegeven rekenmethodiek en behoeven geen nadere toelichting. De bepaling van het buigende moment in de buigslappe voeg wordt navolgend toegelicht.

Buigende momenten in de buigslappe voeg worden enerzijds veroorzaakt door de wielprenten op de voeg en anderzijds door de opgelegde vervormingen vanuit de aansluitende brugdekken. Voor de sterkte-toets mogen, zoals eerder is beschreven, de momenten door opgelegde vervormingen buiten beschouwing worden gelaten. De navolgende beschouwing heeft daarom alleen betrekking op de bruikbaarheidsgrenstoestand en de grenstoestand vermoeiing. Bij beide toetsen is het noodzakelijk om de staalspanning te berekenen, waarbij lineair elastisch materiaalgedrag van het betonstaal geldt (geen vloeitak). Voor het beton geldt bilineair materiaalgedrag (knikpunt bij 1,75 ‰).

In het rekenvoorbeeld wordt het buigende moment door de opgelegde vervormingen berekend op basis van de opgelegde kromming κ in de beschouwde steunpuntsdoorsnede. Bij een bekende kromming κ kan, met een doorsnede-berekening, het bijbehorende moment M worden berekend. Het moment door de wielprenten wordt daar vervolgens bij opgeteld om het totale moment te verkrijgen. Met deze superpositie wordt een kleine fout gemaakt, omdat het materiaalgedrag van het beton niet-lineair is. In figuur 11 is het M_{κ} -diagram schematisch weergegeven. Voor de bepaling van het moment door de kromming is uitgegaan van het gedrag vanaf de oorsprong. Bij een combinatie van deze opgelegde kromming met een moment door de wielprenten, is het totale moment groter en de secans buigstijfheid iets lager. Ook een normaaltrekkracht heeft een (beperkte) invloed op de buigstijfheid en daarmee op het moment door de opgelegde kromming. Bij de superpositie wordt echter impliciet uitgegaan van een lineair verband tussen het moment en de kromming. De fout die wordt gemaakt, is

zeer beperkt, enerzijds omdat het M_{κ} -diagram slechts licht geknikt is en anderzijds omdat het moment door de wielprenten relatief beperkt is ten opzichte van het moment door de opgelegde vervormingen.



Figuur 11: Bepaling moment door opgelegde kromming

5.6

Resultaten parameterstudie

Voor de ontwikkeling van de standaarddetails is een parameterstudie uitgevoerd om de grootte van de opgelegde vervormingen en de normaaltrekkkrachten te bepalen binnen het toepassingsgebied van de standaarddetails. De gehanteerde parameters voor de standaarddetails zijn gegeven in tabel 2.

Tabel 2: Gehanteerde parameters voor standaarddetails

	Railbalken met druklaag	Kokerliggers
Normaalkracht door rembelasting	$N_{rem} = 103 \text{ kN/m}$	$N_{rem} = 103 \text{ kN/m}$
Normaalkracht door verkorting	$N_{\epsilon} = 100 \text{ kN/m}$	$N_{\epsilon} = 96 \text{ kN/m}$
Hoekverdraaiing		
- kruip	$\varphi_{1a} = \varphi_{2a} = 0 \text{ mrad}$	$\varphi_{1a} = \varphi_{2a} = 0 \text{ mrad}$
- rustende belasting	$\varphi_{1b} = 1,0 \text{ mrad}$	$\varphi_{1b} = 1,8 \text{ mrad}$
- verkeer configuratie 1	$\varphi_{2b} = \varphi_{1b} = 1,0 \text{ mrad}$	$\varphi_{2b} = \varphi_{1b} = 2,0 \text{ mrad}$
- verkeer configuratie 2	$\varphi_{1c} = 3,3 \text{ mrad}$	$\varphi_{1c} = 3,3 \text{ mrad}$
- temperatuur	$\varphi_{2c} = 0 \text{ mrad}$	$\varphi_{2c} = 0 \text{ mrad}$
	$\varphi_{1d} = 5,9 \text{ mrad}$	$\varphi_{1d} = 5,6 \text{ mrad}$
	$\varphi_{2d} = 0 \text{ mrad}$	$\varphi_{2d} = 0 \text{ mrad}$
	$\varphi_{1e} = 0,8 \text{ mrad}$	$\varphi_{1e} = 0,8 \text{ mrad}$
	$\varphi_{2e} = 0,8 \text{ mrad}$	$\varphi_{2e} = 0,8 \text{ mrad}$
Hoekverdraaiing door TS1 in rijstrook voor zwaar verkeer (ten behoeve van vermoeiing)	$\varphi_1 = 1,9 \text{ mrad}$ bij $L = 15,6 \text{ m}$	$\varphi_1 = 1,9 \text{ mrad}$ bij $L = 21,0 \text{ m}$

Bij berekeningen van buigslappe voegen buiten de standaarddetails kunnen, bij brugdekken die zijn opgebouwd uit railbalken of kokerliggers, eventueel enkele waarden in de berekening worden overgenomen. Hiermee kan het benodigde

rekenwerk worden beperkt. De volgende voorwaarden uit het toepassingsgebied zijn daarbij van toepassing:

opgelegde hoekverdraaiingen:

- kruisingshoek $60 \text{ graden} \leq \alpha \leq 120 \text{ graden}$
- randvoorwaarde constructiehoogte:
 - $h \geq 1/25 L$ voor railbalken met druklaag
 - $h \geq 1/31 L$ voor kokerliggers
- betonsterkteklasse prefab $\geq C55/67$

normaaltrekkkracht door verkorting:

- ongedilateerde lengte $\leq 150 \text{ m}$

normaaltrekkkracht door rembelasting:

- brugbreedte $\geq 9 \text{ m}$

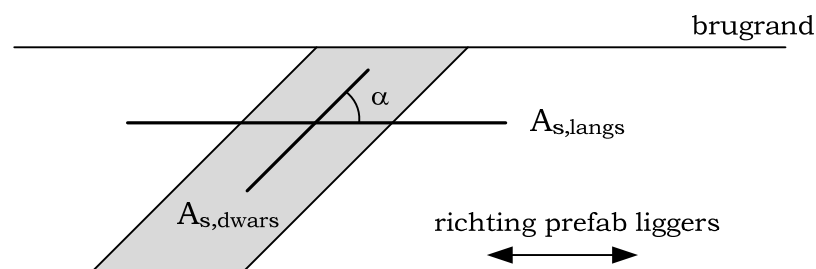
Voor de hoekverdraaiing door kruip moet worden nagegaan of een waarde nul terecht is voor de beschouwde situatie.

Bij het overnemen van waarden moet worden bedacht dat deze waarden aan de veilige kant zijn. Zo is bijvoorbeeld uitgegaan van erg slanke brugdekken. In de praktijk zal het veelal lonend zijn om de invoerparameters zelf te bepalen.

5.7

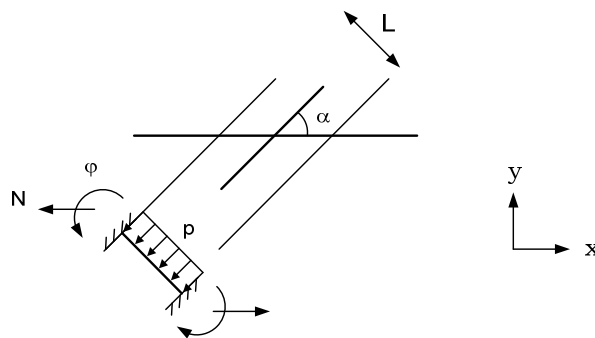
Scheve kruisingen

Bij scheve kruisingen is sprake van niet orthogonale wapening in de buigslappe voeg. De hoofdwapening ligt in de richting evenwijdig aan de prefab liggers, terwijl de dwarswapening daar niet loodrecht op ligt, zie figuur 12.



Figuur 12: Wapeningsrichtingen in buigslappe voeg bij scheve kruising

Buiten het "storingsgebied" aan de rand van het brugdek, zal de voeg zich hoofdzakelijk als rechte plaat in de korte overspanningsrichting willen gedragen, zie figuur 13. Wielprenten worden hoofdzakelijk in die richting afgedragen en opgelegde hoekverdraaiingen werken om de as van het steunpunt. Alleen de opgelegde normaaltrekkkracht werkt in een afwijkende richting, namelijk in richting van de prefab liggers.



Figuur 13: Werking buigslappe voeg in middengebied bij scheve kruising

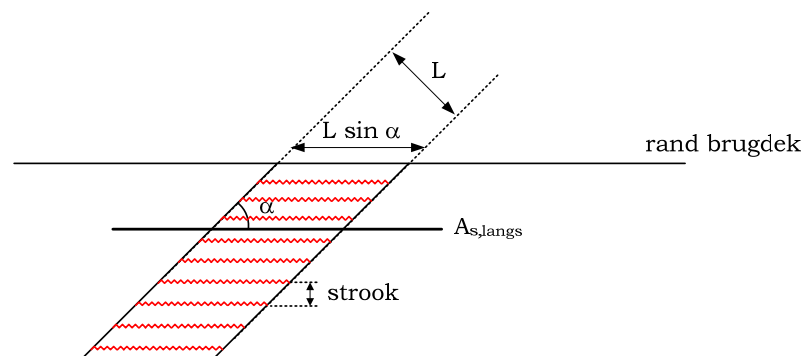
Voor de berekening van niet-orthogonale wapening zijn verschillende mogelijkheden voorhanden. CUR Rapport 54 "Wapenen van platen" geeft bijvoorbeeld een rekenmethodiek op basis van een evenwichtsmodel, waarbij wordt uitgegaan van een gedrukte en getrokken gewapende schijf voor opname van het moment en een tussenlaag voor opname van de dwarskracht. Deze methodiek is geschikt voor opgelegde belastingen, maar niet bruikbaar voor opgelegde vervormingen. Met fysisch niet-lineaire eindige elementenberekeningen is nagegaan hoe kan worden omgegaan met opgelegde vervormingen bij niet-orthogonale wapening. Op basis van het inzicht dat is verkregen met de eindige elementenberekeningen, is voor scheve kruisingen een rekenmethodiek voor buigslappe voegen ontwikkeld. Hierna is deze methodiek beschreven aan de hand van de verschillende relevante toetsingen voor de buigslappe voeg:

1. Statische sterkte van de voeg
 - a. Momentcapaciteit
 - b. Dwarskrachtcapaciteit
2. Scheurwijdte
3. Vermoeiingssterkte

Ad. 1, Statische sterkte van de voeg

Zoals eerder is toegelicht, zijn voor de toets van de statische sterkte alleen de belasting door de wielprenten op de voeg en de rembelasting van belang. Opgelegde vervormingen worden niet meegenomen in de uiterste grenstoestand, omdat de buigslappe voeg voldoende ductiel gedrag vertoont.

Voor de belasting door de wielprenten zou CUR 54 kunnen worden toegepast. Dit leidt echter bij kleinere hoeken tot grote hoeveelheden wapening. Voor een beschouwing van de sterkte van de voeg mag ook een ander evenwichtsmodel worden gekozen. Daarom wordt, in plaats van toepassing van CUR 54, uitgegaan van de schuine overspanning van de voeg. Bij een hoek van 45° neemt het maximale buigende moment dan toe met een factor $\sqrt{2^2} = 2$ en de maximale dwarskracht met een factor $\sqrt{2}$. De voeg wordt als het ware opgedeeld in afzonderlijke stroken met een overspanning gelijk aan $L / \sin \alpha$, zie figuur 14.



Figuur 14: Evenwichtsmodel voor beschouwing sterkte (strokenmethode)

Ad. 2, Scheurwijdte

Uit berekeningen die zijn gemaakt voor de ontwikkeling van de standaarddetails, volgt dat de scheurwijdte hoofdzakelijk wordt bepaald door de opgelegde hoekverdraaiing vanuit het aansluitende veld. Deze hoekverdraaiing wordt met name veroorzaakt door de verkeersbelasting in het veld. De belastingscombinatie met alle verkeersbelasting in het veld en dus zonder wielprenten op de voeg zelf, is veelal maatgevend. Voor de belastingscombinatie waarbij wel wielprenten op de voeg aanwezig zijn, spelen deze wielprenten een ondergeschikte rol en is de invloed van de opgelegde hoekverdraaiing dominant.

Om iets te kunnen zeggen over de scheurwijdte bij een scheve kruising, is eerst het gedrag bij een rechte kruising nader toegelicht. In de rekensheet (zie bijlage A) is de staalspanning bij de opgelegde hoekverdraaiing, eventueel in combinatie met wielprenten op de voeg, berekend. Vervolgens is op basis van deze staalspanning de scheurwijdte w volgens EC-2 berekend. Zoals hiervoor is aangegeven, is de hoekverdraaiing dominant. In dat geval bestaat in werkelijkheid een directe relatie tussen de som van de breedtes van de aanwezige scheuren en de (dominante) opgelegde hoekverdraaiing. Of anders gezegd, de som van de scheurwijdten aan de bovenzijde van de voeg moet gelijk zijn aan de horizontale verplaatsing die aan het uiteinde van de voeg aan de bovenzijde wordt opgelegd door de hoekverdraaiing.

Bij een scheve kruising loopt de langswapening in de voeg niet meer in de richting van de opgelegde hoekverdraaiing. De scheurrichting kan hierdoor ook enigszins wijzigen, maar deze verandering van richting zal beperkt zijn. De scheur ter plaatse van de aansluiting tussen de voeg en het rijdek zal namelijk niet van richting veranderen. Gezien de relatief korte lengte van een buigslappe voeg en het gering aantal scheuren, wordt verwacht dat ook andere scheuren nauwelijks van richting zullen veranderen door de "gedwongen" richting ter plaatse van de aansluitingen met de aansluitende brugdekken. Ook bij een scheve kruising zal gelden dat de som van de scheurwijdten, gemeten in de richting van de opgelegde hoekverdraaiing, gelijk moet zijn aan de opgelegde horizontale verplaatsing aan de bovenzijde van de voeg door de hoekverdraaiing ter plaatse van de aansluiting op het dek. Dit is dus niet anders dan in de rechte situatie. Een verschil is echter dat de wapening bij een afname van de kruisingshoek steeds minder effectief de scheurwijdte zal beperken. Verondersteld wordt dat dit tot uiting komt in de scheurafstand. Hoe kleiner de hoek, hoe groter de scheurafstand. Bij het extreme geval dat de kruisingshoek naar 0° toe gaat, zal uiteindelijk sprake zijn van slechts één scheur ter plaatse van de aansluiting met het rijdek. In uitgevoerde berekeningen voor de ontwikkeling van de standaarddetails voor de rechte situatie, varieerde de maximale scheurafstand van 290 tot 320 mm. Bij een voeglengte van 800 mm is het totaal aantal scheuren dus minimaal 2 of 3. Bij een scheve kruising wordt verwacht dat de maximale

scheurafstand zal toenemen. Als *pragmatische benadering* kan de scheurafstand s_{rmax} in de rekensheet worden gedeeld door $\sin \alpha$, waarbij de rest van de scheurwijdteberekening niet wordt gewijzigd. Bij een kruisingshoek van 45° leidt dit tot een toename van de scheurafstand (en dus de scheurwijdte) met een factor $\sqrt{2}$.

Ad. 3, Vermoeiingssterkte

Als veilig uitgangspunt kunnen de spanningswisselingen door de wielprenten worden bepaald met CUR 54. Met behulp van de formules in CUR 54 zijn factoren afgeleid voor verschillende kruisingshoeken, zie factor ξ_1 in tabel 3. De spanning in de langwapening kan worden berekend door de spanning voor de fictieve situatie met wapening in de kortste overspanningsrichting te vermenigvuldigen met ξ_1 .

Voor de spanningswisselingen door de opgelegde hoekverdraaiing kan gebruik worden gemaakt van factoren die zijn afgeleid uit EEM berekeningen, zie factor ξ_2 in tabel 3. Ook hier geldt dat de spanning in de langwapening kan worden berekend door de spanning voor de fictieve situatie met wapening in de kortste overspanningsrichting te vermenigvuldigen met de gegeven factor. Voor tussengelegen hoeken kan lineair worden geïnterpoleerd.

Tabel 3: Factoren voor bepaling spanning in de langwapening bij verschillende kruisingshoeken, factor ξ_1 voor de belasting door wielprenten op de voeg en ξ_2 voor opgelegde hoekverdraaiingen

kruisingshoek	90°	82.5°	75°	67.5°	60°	52.5°	45°
factor ξ_1	1.00	1.15	1.35	1.62	2.00	2.56	3.41
factor ξ_2	1.00	0.98	0.93	0.85	0.75	0.63	0.50

Uit de uitgevoerde EEM berekeningen volgt dat de dwarswapening slechts een beperkte rol vervult. Zeker als voor de sterkte wordt uitgegaan van stroken, zoals toegelicht onder punt 1, kan worden verondersteld dat de praktische dwarswapening in de standaarddetails voor een rechte kruising ook zal voldoen voor scheve kruisingen. Deze wapening hoeft daarom niet afzonderlijk te worden berekend. Dit betekent dat alleen de hoofdwapening in de voeg hoeft te worden beschouwd op vermoeiing.

Bijlage A:

Rekenvoorbeelden buigslappe voeg

- standaarddetail kokerliggers ($\alpha = 90^\circ$)
- standaarddetail railbalken met druklaag ($\alpha = 90^\circ$)

BEREKENING BUIGSLAPPE VOEGEN - Standaarddetail kokerliggers

File: Buigslap-v08.xmcd

Mathcad 14.0

datum: december 2016

1. ALGEMENE GEGEVENS	2
1.1 Eenheden	
1.2 Afkortingen	
1.3 Beschouwde doorsnede	
2. UITGANGSPUNTEN	3
2.1 Geometrie	
2.2 Wapeningshoeveelheid en ligging	
2.3 Materialen	
2.3.1 Beton	
2.3.2 Betonstaal	
2.4 Belastinggevallen	
2.4.1 Verkeersbelasting op de voeg (BG1)	
2.4.2 Normaaltrekkracht door rembelasting (BG2)	
2.4.3 Opgelegde vervormingen (BG3)	
2.5 Gevolgklasse en belastingsfactoren	
2.6 Toelaatbare scheurwijdte	
2.7 Ontwerplevensduur	
3. TOETS STERKTE (UGT/STR)	9
3.1 Buiging en trek	
3.1.1 <i>Toets momentcapaciteit (negatieve buiging)</i>	
3.1.2 <i>Toets betondrukzonehoogte</i>	
3.2 Dwarskracht en trek	
3.2.1 <i>Bepaling rekenwaarde dwarskracht en trekkracht</i>	
3.2.2 <i>Bepaling dwarskrachtcapaciteit</i>	
3.2.3 <i>Toets dwarskracht</i>	
4. TOETS SCHEURWIJDTE (BGT)	12
4.1 Krommingen door opgelegde vervormingen	
4.2 Momenten door opgelegde krommingen	
4.2.1 <i>Verkeersbelasting configuratie 1 - karakteristiek</i>	
4.2.2 <i>Verkeersbelasting configuratie 1 - frequent</i>	
4.2.3 <i>Verkeersbelasting configuratie 2 - karakteristiek</i>	
4.2.4 <i>Verkeersbelasting configuratie 2 - frequent</i>	
4.2.5 <i>Samenvatting van momenten door opgelegde krommingen</i>	
4.3 Berekening staalspanning door belasting en opgelegde vervormingen	
4.3.1 <i>Verkeersbelasting configuratie 1 - karakteristieke combinatie</i>	
4.3.2 <i>Verkeersbelasting configuratie 1 - frequente combinatie</i>	
4.3.3 <i>Verkeersbelasting configuratie 2 - karakteristieke combinatie</i>	
4.3.4 <i>Verkeersbelasting configuratie 2 - frequente combinatie</i>	
4.3.5 <i>Samenvatting van staalspanningen door belasting en opgelegde vervormingen</i>	
4.4 Toets maximale staalspanning	
4.5 Scheurwijdte toets	
5. TOETS VERMOEIING (UGT/FAT)	19
5.1 Staal- en betonspanning als functie van kromming en moment	
5.2 Vermoeiingsbelasting FLM4b	
5.3 Vermoeiingsschade volgens Miner	
5.4 Vermoeiingstoetsen	
6. DETAILLERING	41
6.1 Staafafstanden	
6.2 Verankerings- en overlaplengte	
7. SAMENVATTING	43

1. ALGEMENE GEGEVENS

1.1 Eenheden

SI eenheden

m (meter)

N (Newton)

rad (radialen)

Afgeleide eenheden:

mm (millimeter)

kN (kilonewton)

kNm (kilonewtonmeter)

kNm := kN·m

MPa (megapascal = newton/millimeter²)

mrad (millirad)

mrad := rad·10⁻³

1.2 Afkortingen

UGT = uiterste grenstoestand

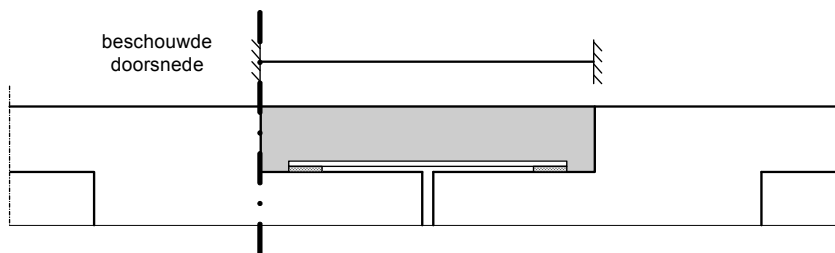
BGT = bruikbaarheidsgrenstoestand

STR = sterkte (strength)

FAT = vermoeiing (fatigue)

1.3 Beschouwde doorsnede

Deze rekensheet betreft een toetsing van de maatgevende steunpuntdoorsnede op negatieve buiging. Verondersteld is dat een onderwapening gelijk aan ten minste de helft van de bovenwapening aanwezig is. Een toetsing op positieve buiging (steunpunt en veld) is in dat geval niet noodzakelijk.



2. UITGANGSPUNTEN

Invoerparameters zijn als volgt omkaderd en gearceerd:

invoerwaarde

Resultaten van toetsingen zijn als volgt omkaderd en gemarkeerd

resultaat

2.1 Geometrie

voeghoogte (zie figuur)

$h := 170\text{mm}$

voeglengte (zie figuur, gemeten loodrecht op as steunpunt)

$L := 800\text{mm}$

dagmaat (voor dwarskrachttoets)

$$L_{\text{dag}} := L - 2 \cdot 50\text{mm}$$

$L_{\text{dag}} = 700\text{mm}$

overspanning (NEN-EN 1992-1-1, fig. 5.4))

$$L_t := L_{\text{dag}} + h$$

$L_t = 870\text{mm}$

breedte van de buigslappe voeg (= brugbreedte)

$b := 9\text{m}$

totale ongedilateerde lengte van de brug

$L_{\text{brug}} := 150\text{m}$

aantal overspanningen

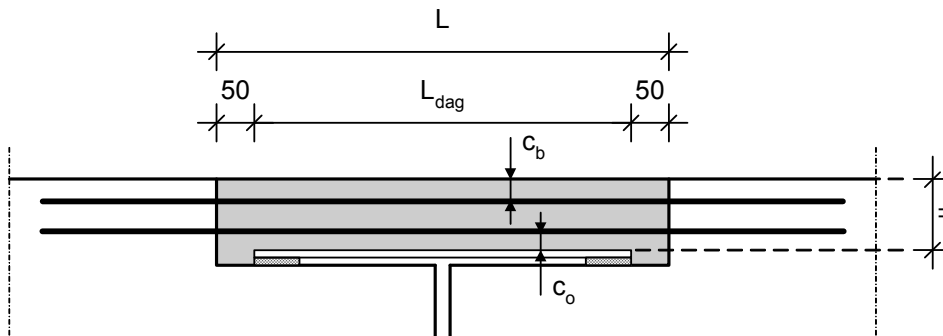
$n_0 := 6$

asfaltdikte bij buigslappe voeg

$d_{\text{asf}} := 0.12\text{m}$

kruisingshoek (recht = 90 graden)

$\alpha := 90\text{deg}$



2.2 Wapeningshoeveelheid en ligging

vereiste betondekking bovenzijde

$c_{\text{nom.b}} := 50\text{mm}$

vereiste betondekking onderzijde

$c_{\text{nom.o}} := 30\text{mm}$

bovenwapening:

staafdiameter

$\varnothing_b := 12\text{mm}$

staafafstand

$s_b := 75\text{mm}$

betondekking

$c_b := 62\text{mm}$

controle betondekking

controle1 := $\begin{cases} \text{"voldoet"} & \text{if } c_b \geq c_{\text{nom.b}} \\ \text{"voldoet niet"} & \text{otherwise} \end{cases}$

controle1 = "voldoet"

oppervlakte

$$A_{\text{sb}} := \frac{\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot \varnothing_b^2}{s_b}$$

$A_{\text{sb}} = 1508 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$

ligging t.o.v. onderzijde

$$d_b := h - c_b - \frac{1}{2} \cdot \varnothing_b$$

$d_b = 102\text{mm}$

onderwapening (50% van bovenwapening):

staafdiameter	$\varnothing_o := \varnothing_b$	$\varnothing_o = 12\text{-mm}$
staafafstand	$s_o := 2 \cdot s_b$	$s_o = 150\text{-mm}$
betondekking		$c_o := 30\text{mm}$

controle betondekking	controle2 :=	$\begin{cases} \text{"voldoet"} & \text{if } c_o \geq c_{\text{nom.o}} \\ \text{"voldoet niet"} & \text{otherwise} \end{cases}$
-----------------------	--------------	---

controle2 = "voldoet"

oppervlakte	$A_{s_o} := \frac{\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot \varnothing_o^2}{s_o}$	$A_{s_o} = 754 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$
-------------	--	--

ligging t.o.v. onderzijde	$d_o := c_o + \frac{1}{2} \cdot \varnothing_o$	$d_o = 36\text{-mm}$
---------------------------	--	----------------------

dwarswapening:

staafdiameter		$\varnothing_{\text{dwars}} := 12\text{mm}$
---------------	--	---

<u>totale hoeveelheid hoofdwapening</u>	$A_s := A_{s_b} + A_{s_o}$	$A_s = 2262 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$
---	----------------------------	---

2.3 Materialen

2.3.1 Beton

NEN-EN 1992-1-1, art. 3.1.6 en 3.1.7 en Tabel 3.1

karacteristieke cilinderdruksterkte (bijv. C35/45 => $f_{ck} = 35\text{ MPa}$)		$f_{ck} := 35\text{MPa}$
---	--	--------------------------

maximale korreldiameter (t.b.v. controle tussenafstanden)		$d_g := 16\text{mm}$
---	--	----------------------

materiaalfactor beton		$\gamma_C := 1.5$
-----------------------	--	-------------------

langeduur effect		$\alpha_{cc} := 1.0$
------------------	--	----------------------

rekenwaarde druksterkte	$f_{cd} := \frac{\alpha_{cc} \cdot f_{ck}}{\gamma_C}$	$f_{cd} = 23.3\text{-MPa}$
-------------------------	---	----------------------------

gemiddelde druksterkte	$f_{cm} := f_{ck} + 8\text{MPa}$	$f_{cm} = 43\text{-MPa}$
------------------------	----------------------------------	--------------------------

gemiddelde treksterkte	$f_{ctm} := 0.3 \cdot \left(\frac{f_{ck}}{\text{MPa}} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot \text{MPa}$	$f_{ctm} = 3.21\text{-MPa}$
------------------------	--	-----------------------------

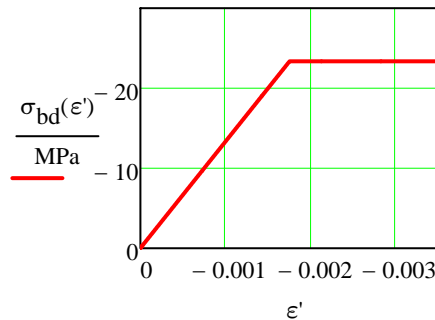
secans elasticiteitsmodulus	$E_{cm} := 22\text{GPa} \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10\text{MPa}} \right)^{0.3}$	$E_{cm} = 34.1\text{-GPa}$
-----------------------------	---	----------------------------

rek knikpunt bi-lineair diagram		$\epsilon_{c3} := -1.75 \cdot 10^{-3}$
---------------------------------	--	--

maximale rek (stuikrek) bi-lineair diagram		$\epsilon_{cu} := -3.5 \cdot 10^{-3}$
--	--	---------------------------------------

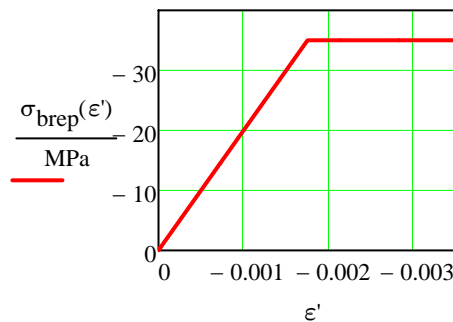
beschrijving σ - ε diagram UGT
(NEN-EN 1992-1-1, figuur 3.4)

$$\sigma_{bd}(\varepsilon) := \begin{cases} -f_{cd} \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c3}} & \text{if } \varepsilon \leq 0 \wedge \varepsilon > \varepsilon_{c3} \\ -f_{cd} & \text{if } \varepsilon \leq \varepsilon_{c3} \wedge \varepsilon > \varepsilon_{cu} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$



beschrijving σ - ε diagram BGT

$$\sigma_{brep}(\varepsilon) := \begin{cases} -f_{ck} \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c3}} & \text{if } \varepsilon \leq 0 \wedge \varepsilon > \varepsilon_{c3} \\ -f_{ck} & \text{if } \varepsilon \leq \varepsilon_{c3} \wedge \varepsilon > \varepsilon_{cu} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$



2.3.2 Betonstaal

NEN-EN 1992-1-1, art. 3.2.7

karacteristieke vloeigrens (B500B => $f_{yk} = 500$ MPa)

$$f_{yk} := 500 \text{ MPa}$$

materiaalfactor betonstaal

$$\gamma_S := 1.15$$

rekenwaarde vloeigrens

$$f_{yd} := \frac{f_{yk}}{\gamma_S}$$

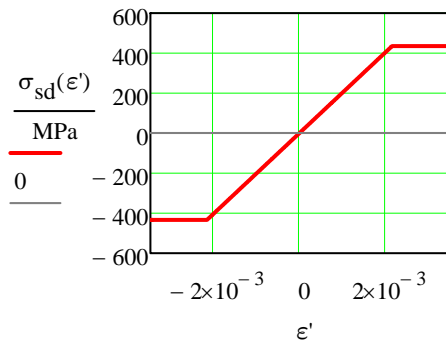
$$f_{yd} = 435 \text{ MPa}$$

elasticiteitsmodulus

$$E_s := 2 \cdot 10^5 \text{ MPa}$$

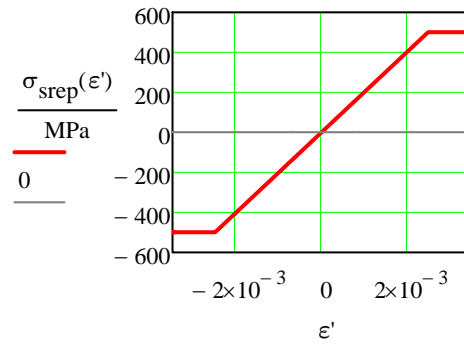
beschrijving σ - ε diagram UGT

$$\sigma_{sd}(\varepsilon) := \begin{cases} -f_{yd} & \text{if } \varepsilon < \frac{-f_{yd}}{E_s} \\ \varepsilon \cdot E_s & \text{if } \varepsilon \geq \frac{-f_{yd}}{E_s} \wedge \varepsilon \leq \frac{f_{yd}}{E_s} \\ f_{yd} & \text{if } \varepsilon > \frac{f_{yd}}{E_s} \end{cases}$$



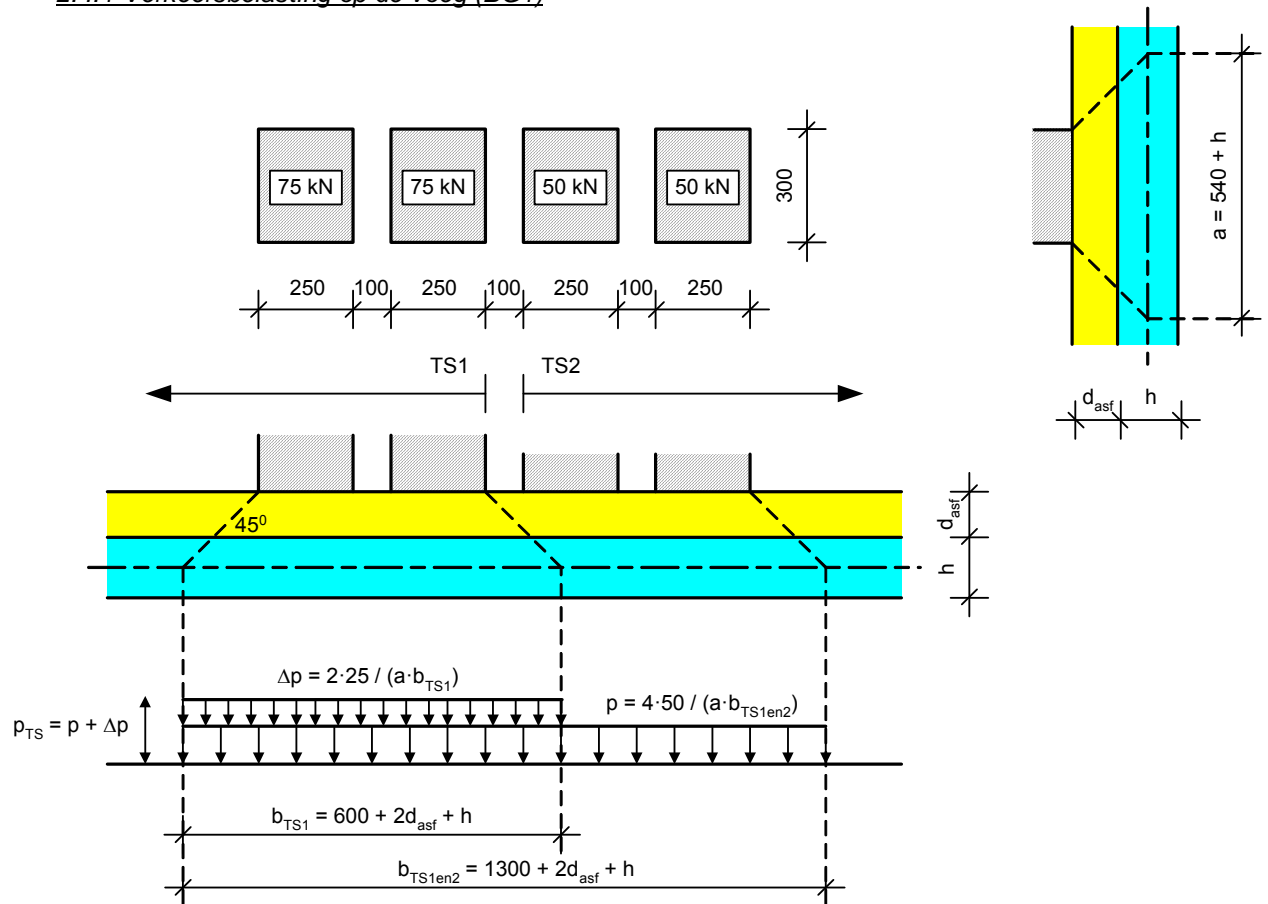
beschrijving σ - ϵ diagram BGT

$$\sigma_{srep}(\epsilon) := \begin{cases} -f_{yk} & \text{if } \epsilon < \frac{-f_{yk}}{E_s} \\ \epsilon \cdot E_s & \text{if } \epsilon \geq \frac{-f_{yk}}{E_s} \wedge \epsilon \leq \frac{f_{yk}}{E_s} \\ f_{yk} & \text{if } \epsilon > \frac{f_{yk}}{E_s} \end{cases}$$



2.4 Belastingsgevallen

2.4.1 Verkeersbelasting op de voeg (BG1)



spreiding in langsrichting

$$a := 0.3\text{m} + 2 \cdot d_{\text{asf}} + h$$

$$a = 0.71\text{ m}$$

spreiding dwarsrichting TS1

$$b_{\text{TS1}} := 0.6\text{m} + 2 \cdot d_{\text{asf}} + h$$

$$b_{\text{TS1}} = 1.01\text{ m}$$

spreiding dwarsrichting TS1+TS2

$$b_{\text{TS1en2}} := 1.3\text{m} + 2 \cdot d_{\text{asf}} + h$$

$$b_{\text{TS1en2}} = 1.71\text{ m}$$

gelijkmatig verdeelde belasting

$$p_{\text{TS}} := \frac{4 \cdot 50\text{kN}}{a \cdot b_{\text{TS1en2}}} + \frac{2 \cdot 25\text{kN}}{a \cdot b_{\text{TS1}}}$$

$$p_{\text{TS}} = 234 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

2.4.2 Normaaltrekkracht door rembelasting (BG2)

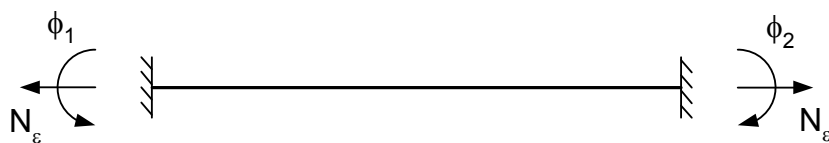
bovengrens voor normaaltrekkracht

$$N_{\text{rem}} := \frac{360\text{kN}}{4\text{m}} + \frac{3.11 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot \frac{1}{4} \cdot L_{\text{brug}}}{b}$$

$$N_{\text{rem}} = 103 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

2.4.3 Opgelegde vervormingen (BG3)

LET OP: tekenafspraken volgens figuur



hoekverdraaiingen door kruip (BG3a)

$$\phi_{1a} := 0 \text{ mrad}$$

$$\phi_{2a} := 0 \text{ mrad}$$

hoekverdraaiingen door rustende belasting (BG3b)

$$\phi_{1b} := 1.8 \text{ mrad}$$

$$\phi_{2b} := 1.8 \text{ mrad}$$

hoekverdraaiing door verkeer config 1 (BG3c)

$$\phi_{1c} := 3.3 \text{ mrad}$$

hoekverdraaiing door verkeer config 2 (BG3d)

$$\phi_{1d} := 5.6 \text{ mrad}$$

hoekverdraaiingen door temperatuurgradiënt (BG3e)

$$\phi_{1e} := 0.8 \text{ mrad}$$

$$\phi_{2e} := 0.8 \text{ mrad}$$

Voor de vermoeiingsberekening:

hoekverdraaiing door TS1 in het aangrenzende veld in het hart van de rijstrook voor zwaar verkeer

$$\phi_{TS1} := 1.9 \text{ mrad}$$

bijbehorende overspanning van het aangrenzend veld

$$L_{\text{veld}} := 21.0 \text{ m}$$

factor voor wielprenten scheve kruising (conform tabel RTD1023)

$$\xi_1 := 1$$

factor voor opgelegde hoekverdraaiingen scheve kruising (cf. RTD1023)

$$\xi_2 := 1$$

normaalkracht door verkorting (BG3f)

werkende breedte prefab ligger

$$b_w := 1.5 \text{ m}$$

max. horizontale reactie oplegblok

$$H_\epsilon := 48 \text{ kN}$$

maximale normaaltrekkkracht

$$N_\epsilon := \frac{1}{2} \cdot n_0 \cdot H_\epsilon$$

$$N_\epsilon := \frac{1}{2} \cdot n_0 \cdot H_\epsilon$$

$$N_\epsilon = 96 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

2.5 Gevolgklasse en belastingsfactoren

gevolgklasse

$$CC := 2$$

belastingfactor verkeersbelasting

$$\gamma_Q := \begin{cases} 1.2 & \text{if } CC = 1 \\ 1.35 & \text{if } CC = 2 \\ 1.5 & \text{if } CC = 3 \end{cases}$$

$$\gamma_Q = 1.35$$

2.6 Toelaatbare scheurwijdte

NEN-EN 1992-1-1, Tabel 7.1N (milieuklasse X0)

maximale scheurwijdte

$$w_{\text{max}} := 0.4 \text{ mm}$$

2.7 Ontwerplevensduur

ontwerplevensduur (voor vermoeiingstoets)

$$t_{\text{ref}} := 50 \text{ jaar}$$

3. TOETS STERKTE (UGT/STR)

3.1 Buiging en trek

3.1.1 Toets momentcapaciteit (negatieve buiging)

NEN-EN 1992-1-1, art. 6.1

overspanning (in richting voegwapening) $L_{\alpha} := \frac{L_t}{\sin(\alpha)}$ $L_{\alpha} = 0.87 \text{ m}$

spreidingslengte wielprenten $a = 0.71 \text{ m}$

steunpuntsmoment representatief $a := \min(L_{\alpha}, a)$ $a = 0.71 \text{ m}$

$$M_{\text{rep}} := \frac{1}{12} \cdot p_{\text{TS}} \cdot a^2 \cdot \frac{(6 \cdot L_{\alpha}^2 - 8 \cdot a \cdot L_{\alpha} + 3 \cdot a^2)}{L_{\alpha}^2} = 14.5 \cdot \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$$

rekenwaarde steunpuntsmoment $M_{\text{Ed}} := \gamma_Q \cdot M_{\text{rep}}$ $M_{\text{Ed}} = 19.5 \cdot \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$

rekenwaarde normaaltrekkkracht $N_{\text{Ed}} := \gamma_Q \cdot N_{\text{rem}}$ $N_{\text{Ed}} = 139 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

rek onderzijde ($z = 0 \text{ mm}$) $\varepsilon_0 := \varepsilon_{\text{cu}}$

reklijn als functie van z en x $\varepsilon(z, x) := \varepsilon_0 - \frac{\varepsilon_0}{x} \cdot z$

bepaling drukzonehoogte uit normaalkrachtevenwicht

resulterende drukkracht beton $N'_{\text{b}}(x) := \int_0^h \sigma_{\text{bd}}(\varepsilon(z, x)) dz$

kracht in bovenwapening $N_{\text{sb}}(x) := A_{\text{sb}} \cdot \sigma_{\text{sd}}(\varepsilon(d_{\text{b}}, x))$

kracht in onderwapening $N_{\text{so}}(x) := A_{\text{so}} \cdot \sigma_{\text{sd}}(\varepsilon(d_{\text{o}}, x))$

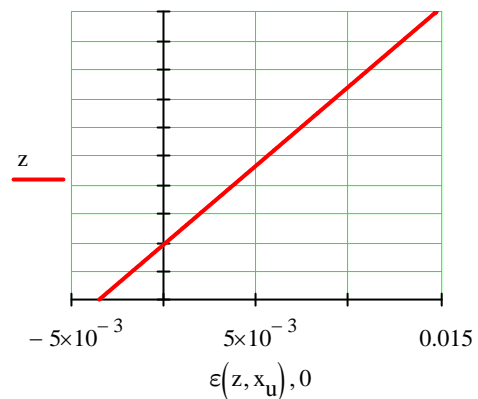
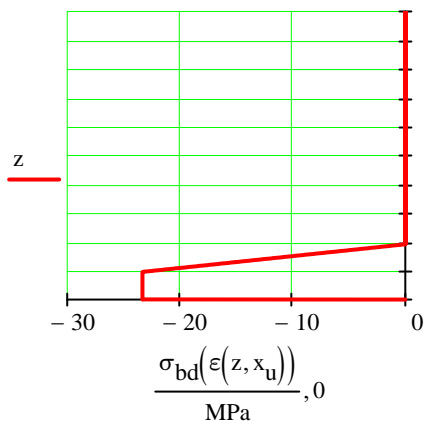
schatwaarde drukzonehoogte $x := 0.5 \cdot h$

Given

$$N'_{\text{b}}(x) + N_{\text{sb}}(x) + N_{\text{so}}(x) - N_{\text{Ed}} = 0$$

$$x_{\text{u}} := \text{Find}(x) \quad x_{\text{u}} = 33 \cdot \text{mm}$$

$$z := 0 \text{ mm}, 0.11 \text{ mm} \dots h$$



drukkracht beton $N'_b(x_u) = -571 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$
 uitwendige normaaltrekkkracht $N_{Ed} = 139 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$
 normaalkracht in bovenwapening $N_{sb}(x_u) = 656 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$ $\sigma_{sb} := \frac{N_{sb}(x_u)}{A_{sb}} = 435 \cdot \text{MPa}$
 normaalkracht in onderwapening $N_{so}(x_u) = 54 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$ $\sigma_{so} := \frac{N_{so}(x_u)}{A_{so}} = 72 \cdot \text{MPa}$
 momentcapaciteit
 $M_{Rd} := \int_0^h \sigma_{bd}(\varepsilon(z, x_u)) \cdot z \, dz + d_o \cdot N_{so}(x_u) + d_b \cdot N_{sb}(x_u) - N_{Ed} \cdot 0.5 \cdot h$ $M_{Rd} = 49.8 \cdot \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$

toets momentcapaciteit $uc_1 := \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}}$ $uc_1 = 0.39$

3.1.2 Toets betondrukzonehoogte NEN-EN 1992-1-1/NB, art. 6.1

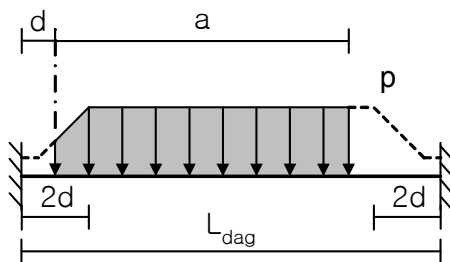
maximale betondrukzonehoogte $x_{umax} := \frac{-\varepsilon_{cu} \cdot 10^6}{-\varepsilon_{cu} \cdot 10^6 + 7 \cdot \frac{f_{yd}}{\text{MPa}}} \cdot d_b$ $x_{umax} = 54.6 \cdot \text{mm}$

toets betondrukzonehoogte $uc_2 := \frac{x_u}{x_{umax}}$ $uc_2 = 0.60$

3.2 Dwarskracht en trek

3.2.1 Bepaling rekenwaarde dwarskracht en trekkkracht NEN-EN 1992-1-1, art. 6.2

Dwarskracht wordt getoetst op afstand d inclusief reductie β (zie 6.2.1 (8) en 6.2.2 (6)).



dagmaat in richting van de voegwapening:

$L_{d\alpha} := \frac{L_{dag}}{\sin(\alpha)}$ $L_{d\alpha} = 0.70 \text{ m}$

dwarskracht in dag oplegging (zonder reductie met β)

$M_{links} := \frac{1}{12} \cdot p_{TS} \cdot a^2 \cdot \frac{(6 \cdot L_{d\alpha}^2 - 8 \cdot a \cdot L_{d\alpha} + 3 \cdot a^2)}{L_{d\alpha}^2} = 9.6 \cdot \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$

$M_{rechts} := \frac{1}{12} \cdot p_{TS} \cdot a^2 \cdot \frac{(4 \cdot L_{d\alpha} - 3 \cdot a) \cdot a}{L_{d\alpha}^2} = 9.6 \cdot \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$

$V_{rep.0} := \frac{p_{TS} \cdot a \cdot (2 \cdot L_{d\alpha} - a)}{2 \cdot L_{d\alpha}} + \frac{M_{links}}{L_{d\alpha}} - \frac{M_{rechts}}{L_{d\alpha}}$

$V_{rep.0} = 82.1 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

dwarskracht op afstand d (inclusief reductie met β)	$V_{rep\beta} := V_{rep.0} - 1.25 \cdot p_{TS} \cdot d_b$	$V_{rep\beta} = 52.2 \cdot \frac{kN}{m}$
---	---	--

normaaltrekkkracht representatief	$N_{rem} = 103 \cdot \frac{kN}{m}$
-----------------------------------	------------------------------------

combinatie γ_Q ($Q_{vert} + 0,8 Q_{rem}$)	$N_{Ed} := -\gamma_Q \cdot 0,8 \cdot N_{rem}$	$N_{Ed} = -111 \cdot \frac{kN}{m}$
	$\sigma_{cp} := \frac{N_{Ed}}{h}$	$\sigma_{cp} = -0,65 \cdot MPa$
	$V_{Ed} := \gamma_Q \cdot V_{rep.0}$	$V_{Ed} = 110,8 \cdot \frac{kN}{m}$
	$V_{Ed\beta} := \gamma_Q \cdot V_{rep\beta}$	$V_{Ed\beta} = 70,4 \cdot \frac{kN}{m}$

3.2.2 Bepaling dwarskrachtcapaciteit NEN-EN 1992-2, art. 6.2.2 (1)

wapeningsfractie	$\rho_1 := \min\left(\frac{A_{sb}}{d_b}, 0,02\right)$	$\rho_1 = 0,015$
------------------	---	------------------

dwarskrachtcapaciteit	$k := \min\left(1 + \sqrt{\frac{200mm}{d_b}}, 2\right)$	$k = 2$
	$C_{Rd.c} := 0,12$	$k_1 := 0,15$

$$V_{Rd.c1} := \left[C_{Rd.c} \cdot k \cdot \left(100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck} \cdot MPa^2\right)^{\frac{1}{3}} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot d_b$$

$$V_{Rd.c1} = 81,2 \cdot \frac{kN}{m}$$

$v_{min} := 0,035 \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{f_{ck}}{MPa}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot MPa$	$v_{min} = 0,59 \cdot MPa$
--	----------------------------

$V_{Rd.c2} := (v_{min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) \cdot d_b$	$V_{Rd.c2} = 49,7 \cdot \frac{kN}{m}$
--	---------------------------------------

$V_{Rd.c} := \max(V_{Rd.c1}, V_{Rd.c2})$	$V_{Rd.c} = 81,2 \cdot \frac{kN}{m}$
--	--------------------------------------

capaciteit betondrukdiagonaal NEN-EN 1992-1-1, formule (6.5)	$V_{Rd.max} := 0,5 \cdot d_b \cdot 0,6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250MPa}\right) \cdot f_{cd}$
---	---

$$V_{Rd.max} = 614 \cdot \frac{kN}{m}$$

3.2.3 Toets dwarskracht

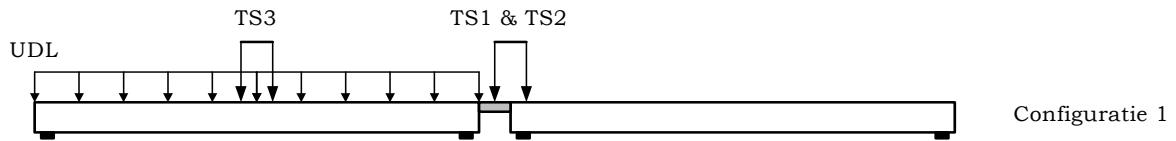
toets dwarskracht op afstand d incl. β	$uc_3 := \frac{V_{Ed\beta}}{V_{Rd.c}}$	$uc_3 = 0,87$
--	--	---------------

toets bezwijken betondrukdiagonaal	$uc_4 := \frac{V_{Ed}}{V_{Rd.max}}$	$uc_4 = 0,18$
------------------------------------	-------------------------------------	---------------

4. TOETS SCHEURWIJDTE (BGT)

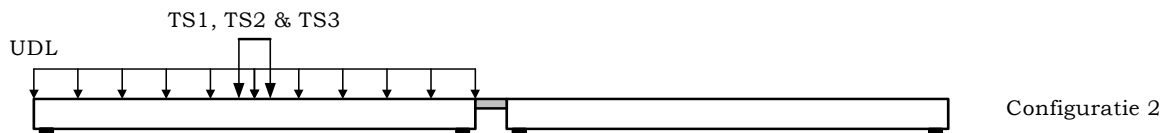
4.1 Krommingen door opgelegde vervormingen

verkeersbelasting configuratie 1 (TS1 en TS2 op de voeg, overige verkeersbelasting in het veld)



hoekverdraaiing belaste veld	karakteristiek	$\phi_{1kar} := \phi_{1a} + \phi_{1b} + \phi_{1c} + 0.3 \cdot \phi_{1e} = 5.3 \cdot \text{mrad}$
	frequent	$\phi_{1freq} := \phi_{1a} + \phi_{1b} + 0.8 \cdot \phi_{1c} + 0.3 \cdot \phi_{1e} = 4.7 \cdot \text{mrad}$
hoekverdraaiing onbelaste veld	karakteristiek	$\phi_{2kar} := \phi_{2a} + \phi_{2b} + 0.3 \cdot \phi_{2e} = 2.0 \cdot \text{mrad}$
	frequent	$\phi_{2freq} := \phi_{2a} + \phi_{2b} + 0.3 \cdot \phi_{2e} = 2.0 \cdot \text{mrad}$
maximale kromming steunpunt	karakteristiek	$\kappa_{1kar} := \frac{4 \cdot \phi_{1kar} - 2 \cdot \phi_{2kar}}{L_t}$
		$\kappa_{1kar} = 0.02 \frac{1}{\text{m}}$
	frequent	$\kappa_{1freq} := \frac{4 \cdot \phi_{1freq} - 2 \cdot \phi_{2freq}}{L_t}$
		$\kappa_{1freq} = 0.017 \frac{1}{\text{m}}$

verkeersbelasting configuratie 2 (alle verkeersbelasting in het veld)



hoekverdraaiing belaste veld	karakteristiek	$\phi_{1kar} := \phi_{1a} + \phi_{1b} + \phi_{1d} + 0.3 \cdot \phi_{1e} = 7.6 \cdot \text{mrad}$
	frequent	$\phi_{1freq} := \phi_{1a} + \phi_{1b} + 0.8 \cdot \phi_{1d} + 0.3 \cdot \phi_{1e} = 6.5 \cdot \text{mrad}$
hoekverdraaiing onbelaste veld	karakteristiek	$\phi_{2kar} := \phi_{2a} + \phi_{2b} + 0.3 \cdot \phi_{2e} = 2.0 \cdot \text{mrad}$
	frequent	$\phi_{2freq} := \phi_{2a} + \phi_{2b} + 0.3 \cdot \phi_{2e} = 2.0 \cdot \text{mrad}$
maximale kromming steunpunt	karakteristiek	$\kappa_{2kar} := \frac{4 \cdot \phi_{1kar} - 2 \cdot \phi_{2kar}}{L_t}$
		$\kappa_{2kar} = 0.03 \frac{1}{\text{m}}$
	frequent	$\kappa_{2freq} := \frac{4 \cdot \phi_{1freq} - 2 \cdot \phi_{2freq}}{L_t}$
		$\kappa_{2freq} = 0.025 \frac{1}{\text{m}}$

4.2 Momenten door opgelegde krommingen

4.2.1 Verkeersbelasting configuratie 1 - karakteristiek

reklijn als functie van z en x

$$\varepsilon(z, x) := -\kappa_{1kar} \cdot x + \kappa_{1kar} \cdot z$$

bepaling drukzonehoogte uit normaalkrachtenevenwicht

resulterende drukkracht beton

$$N'_b(x) := \int_0^h \sigma_{brep}(\varepsilon(z, x)) dz$$

kracht in bovenwapening

$$N_{sb}(x) := A_{sb} \cdot \sigma_{srep}(\varepsilon(d_b, x))$$

kracht in onderwapening

$$N_{so}(x) := A_{so} \cdot \sigma_{srep}(\varepsilon(d_o, x))$$

schatwaarde drukzonehoogte

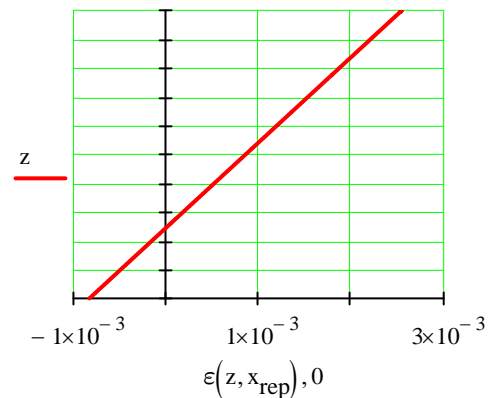
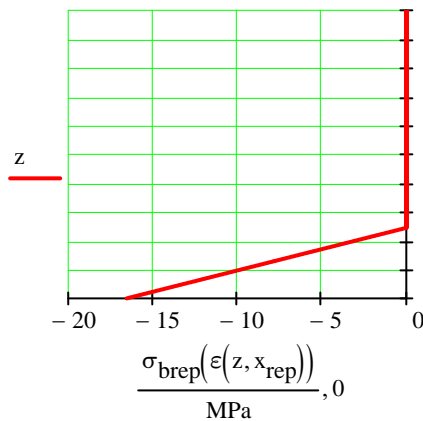
$$x := 0.5 \cdot h$$

Given

$$N'_b(x) + N_{sb}(x) + N_{so}(x) = 0$$

$$x_{rep} := \text{Find}(x) \quad x_{rep} = 41.7 \cdot \text{mm}$$

$$z := 0 \text{mm}, 0.11 \text{mm} \dots h$$



drukkracht beton

$$N'_b(x_{rep}) = -345 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

maximale drukspanning beton

$$\sigma_{brep}(\varepsilon(0, x_{rep})) = -16.5 \cdot \text{MPa}$$

normaalkracht in bovenwapening

$$N_{sb}(x_{rep}) = 362 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\sigma_{sb} := \frac{N_{sb}(x_{rep})}{A_{sb}} = 240 \cdot \text{MPa}$$

normaalkracht in onderwapening

$$N_{so}(x_{rep}) = -17 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\sigma_{so} := \frac{N_{so}(x_{rep})}{A_{so}} = -22 \cdot \text{MPa}$$

representatief moment

$$M_{1kar} := \int_0^h \sigma_{brep}(\varepsilon(z, x_{rep})) \cdot z dz + d_o \cdot N_{so}(x_{rep}) + d_b \cdot N_{sb}(x_{rep})$$

$$M_{1kar} = 31.5 \cdot \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$$

4.2.2 Verkeersbelasting configuratie 1 - frequent

reklijn als functie van z en x

$$\varepsilon(z, x) := -\kappa_{1\text{freq}} \cdot x + \kappa_{1\text{freq}} \cdot z$$

Given

$$\int_0^h \sigma_{\text{brep}}(\varepsilon(z, x)) dz + A_{\text{sb}} \cdot \sigma_{\text{srep}}(\varepsilon(d_{\text{b}}, x)) + A_{\text{so}} \cdot \sigma_{\text{srep}}(\varepsilon(d_{\text{o}}, x)) = 0$$

$$x_{\text{rep}} := \text{Find}(x) \quad x_{\text{rep}} = 41.7 \cdot \text{mm}$$

$$M_{1\text{freq}} := \int_0^h \sigma_{\text{brep}}(\varepsilon(z, x_{\text{rep}})) \cdot z dz + d_{\text{o}} \cdot (A_{\text{so}} \cdot \sigma_{\text{srep}}(\varepsilon(d_{\text{o}}, x_{\text{rep}}))) + d_{\text{b}} \cdot (A_{\text{sb}} \cdot \sigma_{\text{srep}}(\varepsilon(d_{\text{b}}, x_{\text{rep}})))$$

4.2.3 Verkeersbelasting configuratie 2 - karakteristiek

reklijn als functie van z en x

$$\varepsilon(z, x) := -\kappa_{2\text{kar}} \cdot x + \kappa_{2\text{kar}} \cdot z$$

Given

$$\int_0^h \sigma_{\text{brep}}(\varepsilon(z, x)) dz + A_{\text{sb}} \cdot \sigma_{\text{srep}}(\varepsilon(d_{\text{b}}, x)) + A_{\text{so}} \cdot \sigma_{\text{srep}}(\varepsilon(d_{\text{o}}, x)) = 0$$

$$x_{\text{rep}} := \text{Find}(x) \quad x_{\text{rep}} = 41.7 \cdot \text{mm}$$

$$M_{2\text{kar}} := \int_0^h \sigma_{\text{brep}}(\varepsilon(z, x_{\text{rep}})) \cdot z dz + d_{\text{o}} \cdot (A_{\text{so}} \cdot \sigma_{\text{srep}}(\varepsilon(d_{\text{o}}, x_{\text{rep}}))) + d_{\text{b}} \cdot (A_{\text{sb}} \cdot \sigma_{\text{srep}}(\varepsilon(d_{\text{b}}, x_{\text{rep}})))$$

4.2.4 Verkeersbelasting configuratie 2 - frequent

reklijn als functie van z en x

$$\varepsilon(z, x) := -\kappa_{2\text{freq}} \cdot x + \kappa_{2\text{freq}} \cdot z$$

Given

$$\int_0^h \sigma_{\text{brep}}(\varepsilon(z, x)) dz + A_{\text{sb}} \cdot \sigma_{\text{srep}}(\varepsilon(d_{\text{b}}, x)) + A_{\text{so}} \cdot \sigma_{\text{srep}}(\varepsilon(d_{\text{o}}, x)) = 0$$

$$x_{\text{rep}} := \text{Find}(x) \quad x_{\text{rep}} = 41.7 \cdot \text{mm}$$

$$M_{2\text{freq}} := \int_0^h \sigma_{\text{brep}}(\varepsilon(z, x_{\text{rep}})) \cdot z dz + d_{\text{o}} \cdot (A_{\text{so}} \cdot \sigma_{\text{srep}}(\varepsilon(d_{\text{o}}, x_{\text{rep}}))) + d_{\text{b}} \cdot (A_{\text{sb}} \cdot \sigma_{\text{srep}}(\varepsilon(d_{\text{b}}, x_{\text{rep}})))$$

4.2.5 Samenvatting van momenten door opgelegde krommingen

verkeersbelasting configuratie 1	karakteristiek	$\kappa_{1\text{kar}} = 0.02 \frac{1}{\text{m}}$	$M_{1\text{kar}} = 31.5 \cdot \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$
	frequent	$\kappa_{1\text{freq}} = 0.017 \frac{1}{\text{m}}$	$M_{1\text{freq}} = 26.7 \cdot \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$
verkeersbelasting configuratie 2	karakteristiek	$\kappa_{2\text{kar}} = 0.03 \frac{1}{\text{m}}$	$M_{2\text{kar}} = 48.2 \cdot \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$
	frequent	$\kappa_{2\text{freq}} = 0.025 \frac{1}{\text{m}}$	$M_{2\text{freq}} = 40.1 \cdot \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$

4.3 Berekening staalspanning door belastingen en opgelegde vervormingen

4.3.1 Verkeersbelasting configuratie 1 - karakteristieke combinatie

moment door wielprenten op voeg	$\frac{1}{12} \cdot p_{TS} \cdot L^2 = 12.5 \cdot \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$
moment door kromming + verkeer	$M_{1kar} := M_{1kar} + \frac{1}{12} \cdot p_{TS} \cdot L^2 = 44.0 \cdot \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$
normaalkracht door verkorting + rembelasting	$N_{1kar} := N_{\epsilon} + 0.8 \cdot N_{rem} = 178.4 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$
bepaling drukzonehoogte uit momenten- en normaalkrachtevenwicht	
reklijn als functie van z en onbekenden x en ϵ_0	$\epsilon(z, x, \epsilon_0) := \epsilon_0 - \frac{\epsilon_0}{x} \cdot z$
resulterende drukkracht beton	$N'_b(x, \epsilon_0) := \int_0^h \sigma_{brep}(\epsilon(z, x, \epsilon_0)) dz$
kracht in bovenwapening	$N_{sb}(x, \epsilon_0) := A_{sb} \cdot E_s \cdot \epsilon(d_b, x, \epsilon_0)$
kracht in onderwapening	$N_{so}(x, \epsilon_0) := A_{so} \cdot E_s \cdot \epsilon(d_o, x, \epsilon_0)$
schatwaarde drukzonehoogte	$x := 0.5 \cdot h$
schatwaarde rek onderzijde	$\epsilon_0 := \epsilon_{c3} = -1.75 \times 10^{-3}$

Given

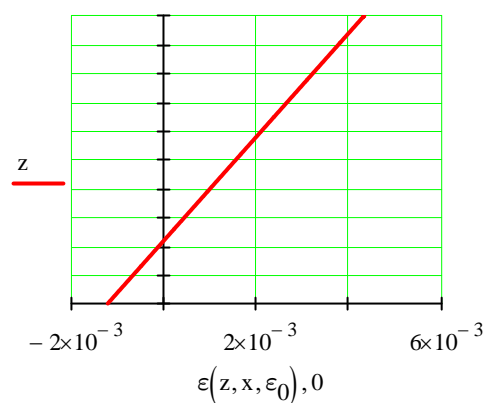
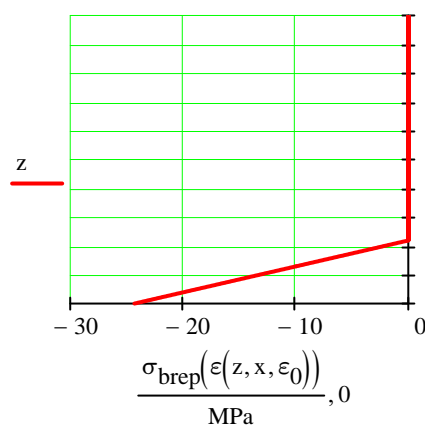
$$N'_b(x, \epsilon_0) + N_{sb}(x, \epsilon_0) + N_{so}(x, \epsilon_0) - N_{1kar} = 0$$

$$\int_0^h \sigma_{brep}(\epsilon(z, x, \epsilon_0)) \cdot z dz + d_o \cdot N_{so}(x, \epsilon_0) + d_b \cdot N_{sb}(x, \epsilon_0) - N_{1kar} \cdot 0.5 \cdot h - M_{1kar} = 0$$

$$\begin{pmatrix} x \\ \epsilon_0 \end{pmatrix} := \text{Find}(x, \epsilon_0)$$

$$x = 37.2 \cdot \text{mm}$$

$$\epsilon_0 = -1.22 \times 10^{-3}$$



kromming	$\frac{-\varepsilon_0}{x} = 0.033 \frac{1}{m}$	uit dek	$\kappa_{1kar} = 0.02 \frac{1}{m}$
drukkraft beton	$N'_b(x, \varepsilon_0) = -453 \cdot \frac{kN}{m}$		
uitwendige normaaltrekkraft	$N_{1kar} = 178 \cdot \frac{kN}{m}$		
normaalkracht in bovenwapening	$N_{sb}(x, \varepsilon_0) = 637 \cdot \frac{kN}{m}$	$\sigma_{s1kar} := \frac{N_{sb}(x, \varepsilon_0)}{A_{sb}} = 422 \cdot MPa$	
normaalkracht in onderwapening	$N_{so}(x, \varepsilon_0) = -6 \cdot \frac{kN}{m}$	$\sigma_{so} := \frac{N_{so}(x, \varepsilon_0)}{A_{so}} = -8 \cdot MPa$	

4.3.2 Verkeersbelasting configuratie 1 - frequente combinatie

moment door kromming + verkeer	$M_{1freq} := M_{1freq} + 0.8 \cdot \frac{1}{12} \cdot p_{TS} \cdot L^2 = 36.7 \cdot \frac{kNm}{m}$
normaalkracht door verkorting + rembelasting	$N_{1freq} := N_{\varepsilon} + 0.8 \cdot 0.8 \cdot N_{rem} = 161.9 \cdot \frac{kN}{m}$

Given

$$N'_b(x, \varepsilon_0) + N_{sb}(x, \varepsilon_0) + N_{so}(x, \varepsilon_0) - N_{1freq} = 0$$

$$\int_0^h \sigma_{brep}(\varepsilon(z, x, \varepsilon_0)) \cdot z \, dz + d_o \cdot N_{so}(x, \varepsilon_0) + d_b \cdot N_{sb}(x, \varepsilon_0) - N_{1freq} \cdot 0.5 \cdot h - M_{1freq} = 0$$

$$\begin{pmatrix} x \\ \varepsilon_0 \end{pmatrix} := \text{Find}(x, \varepsilon_0) \quad x_{1freq} := x = 36.9 \cdot \text{mm} \quad \varepsilon_{1freq} := \varepsilon_0 = -1.02 \times 10^{-3}$$

staalspanning in bovenwapening	$\sigma_{s1freq} := \frac{N_{sb}(x, \varepsilon_0)}{A_{sb}} = 359 \cdot MPa$
--------------------------------	--

4.3.3 Verkeersbelasting configuratie 2 - karakteristieke combinatie

moment door kromming + verkeer	$M_{2kar} = 48.2 \cdot \frac{kNm}{m}$
normaalkracht door verkorting + rembelasting	$N_{2kar} := N_{\varepsilon} + 0.8 \cdot N_{rem} = 178.4 \cdot \frac{kN}{m}$

Given

$$N'_b(x, \varepsilon_0) + N_{sb}(x, \varepsilon_0) + N_{so}(x, \varepsilon_0) - N_{2kar} = 0$$

$$\int_0^h \sigma_{brep}(\varepsilon(z, x, \varepsilon_0)) \cdot z \, dz + d_o \cdot N_{so}(x, \varepsilon_0) + d_b \cdot N_{sb}(x, \varepsilon_0) - N_{2kar} \cdot 0.5 \cdot h - M_{2kar} = 0$$

$$\begin{pmatrix} x \\ \varepsilon_0 \end{pmatrix} := \text{Find}(x, \varepsilon_0) \quad x = 37.6 \cdot \text{mm} \quad \varepsilon_0 = -1.33 \times 10^{-3}$$

staalspanning in bovenwapening	$\sigma_{s2kar} := \frac{N_{sb}(x, \varepsilon_0)}{A_{sb}} = 455 \cdot MPa$
--------------------------------	---

4.3.4 Verkeersbelasting configuratie 2 - frequente combinatie

moment door kromming + verkeer $M_{2freq} = 40.1 \cdot \frac{kNm}{m}$

normaalkracht door verkorting + rembelasting $N_{2freq} := N_{\epsilon} + 0.8 \cdot 0.8 \cdot N_{rem} = 161.9 \cdot \frac{kN}{m}$

Given

$$N'_b(x, \epsilon_0) + N_{sb}(x, \epsilon_0) + N_{so}(x, \epsilon_0) - N_{2freq} = 0$$

$$\int_0^h \sigma_{brep}(\epsilon(z, x, \epsilon_0)) \cdot z \, dz + d_o \cdot N_{so}(x, \epsilon_0) + d_b \cdot N_{sb}(x, \epsilon_0) - N_{2freq} \cdot 0.5 \cdot h - M_{2freq} = 0$$

$$\begin{pmatrix} x \\ \epsilon_0 \end{pmatrix} := \text{Find}(x, \epsilon_0) \quad x_{2freq} := x = 37.3 \cdot \text{mm} \quad \epsilon_{2freq} := \epsilon_0 = -1.107 \times 10^{-3}$$

staalspanning in bovenwapening $\sigma_{s2freq} := \frac{N_{sb}(x, \epsilon_0)}{A_{sb}} = 385 \cdot \text{MPa}$

4.2.5 Samenvatting van staalspanningen door belastingen en opgelegde vervormingen

verkeer config 1	karacteristiek	$M_{1kar} = 44.0 \cdot \frac{kNm}{m}$	$N_{1kar} = 178 \cdot \frac{kN}{m}$	$\sigma_{s1kar} = 422 \cdot \text{MPa}$
	frequent	$M_{1freq} = 36.7 \cdot \frac{kNm}{m}$	$N_{1freq} = 162 \cdot \frac{kN}{m}$	$\sigma_{s1freq} = 359 \cdot \text{MPa}$
verkeer config 2	karacteristiek	$M_{2kar} = 48.2 \cdot \frac{kNm}{m}$	$N_{2kar} = 178 \cdot \frac{kN}{m}$	$\sigma_{s2kar} = 455 \cdot \text{MPa}$
	frequent	$M_{2freq} = 40.1 \cdot \frac{kNm}{m}$	$N_{2freq} = 162 \cdot \frac{kN}{m}$	$\sigma_{s2freq} = 385 \cdot \text{MPa}$

4.4 Toets maximale staalspanning NEN-EN 1992-1-1, art. 7.2 (5)

maatgevende staalspanning $\sigma_{skar} := \max(\sigma_{s1kar}, \sigma_{s2kar})$ $\sigma_{skar} = 455 \cdot \text{MPa}$

toelaatbare staalspanning $k_4 := 1.0$ $\sigma_{max} := k_4 \cdot f_{yk}$ $\sigma_{max} = 500 \cdot \text{MPa}$

toets staalspanning $uc_5 := \frac{\sigma_{skar}}{\sigma_{max}}$ $uc_5 = 0.91$

4.5 Scheurwijdte toets NEN-EN 1992-1-1, art. 7.3.4

maatgevende staalspanning $\sigma_s := \max(\sigma_{s1freq}, \sigma_{s2freq})$ $\sigma_s = 385 \cdot \text{MPa}$

bijbehorende drukzonehoogte $x_{rep} := \text{if}(\sigma_{s1freq} > \sigma_{s2freq}, x_{1freq}, x_{2freq})$ $x_{rep} = 37.3 \cdot \text{mm}$

bijbehorende rek onderzijde $\epsilon_2 := \text{if}(\sigma_{s1freq} > \sigma_{s2freq}, \epsilon_{1freq}, \epsilon_{2freq})$ $\epsilon_2 = -1.11 \times 10^{-3}$

bijbehorende rek bovenzijde $\epsilon_1 := \frac{h - x}{x} \cdot -\epsilon_2$ $\epsilon_1 = 3.94 \times 10^{-3}$

verhouding elasticiteitsmoduli $\alpha_e := \frac{E_s}{E_{cm}}$ $\alpha_e = 5.87$

factor belastingsduur	kortdurend (hoofdzakelijk verkeer)	$k_t := 0.6$
effectieve treksterkte	$f_{ct,eff} := f_{ctm}$	$f_{ct,eff} = 3.21 \cdot \text{MPa}$
effectieve hoogte	$h_{c,ef} := \min \left[2.5 \cdot (h - d_b), \frac{h - x_{rep}}{3}, \frac{h}{2} \right]$	$h_{c,ef} = 44 \cdot \text{mm}$
vergroting effectieve hoogte volgens Duitse NB	$h_{c,ef} := \begin{cases} \frac{h - x_{rep}}{2} & \text{if } c_b + \frac{1}{2} \cdot \varnothing_b > h_{c,ef} \\ h_{c,ef} & \text{otherwise} \end{cases}$	$h_{c,ef} = 66 \cdot \text{mm}$
effectieve oppervlakte	$A_{c,eff} := h_{c,ef}$	$A_{c,eff} = 66369 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$
effectieve wapeningsfractie	$\rho_{p,eff} := \frac{A_{sb}}{A_{c,eff}}$	$\rho_{p,eff} = 0.023$
rekverschil tussen scheuren	$\Delta \varepsilon := \max \left[\frac{\sigma_s - k_t \cdot \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{p,eff})}{E_s}, 0.6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} \right]$ $\Delta \varepsilon = 0.00144$	
scheurafstand	$k_1 := 0.8$ $k_2 := \max \left(\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2 \cdot \varepsilon_1}, 0.5 \right)$ $k_3 := 3.4$ $k_4 := 0.425$ $s_{r,max} := \begin{cases} \left(k_3 \cdot c_b + k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \frac{\varnothing_b}{\rho_{p,eff}} \right) & \text{if } s_b < 5 \cdot \left(c_b + \frac{\varnothing_b}{2} \right) \\ 1.3 \cdot (h - x_{rep}) & \text{if } s_b > 5 \cdot \left(c_b + \frac{\varnothing_b}{2} \right) \end{cases}$ $s_{r,max} = 301 \cdot \text{mm}$	$k_2 = 0.5$
scheurwijdte	$w_k := \frac{s_{r,max}}{\sin(\alpha)} \cdot \Delta \varepsilon$	$w_k = 0.43 \cdot \text{mm}$
toelaatbare scheurwijdte	$k_x := \frac{c_b}{c_{nom,b}}$ $w_{max} = 0.40 \cdot \text{mm}$	$k_x = 1.24$
toets scheurwijdte	$uc_6 := \frac{w_k}{k_x \cdot w_{max}}$	$uc_6 = 0.87$

5. TOETS VERMOEIING (UGT/FAT)

5.1 Staal- en betonspanning als functie van moment en kromming

reklijn als functie van z en x $\epsilon(z, x) := \epsilon_{c3} - \frac{\epsilon_{c3}}{x} \cdot z$ $\epsilon_{c3} = -1.75 \times 10^{-3}$

resulterende drukkracht beton $N'_b(x) := \int_0^h \sigma_{brep}(\epsilon(z, x)) dz$

kracht in bovenwapening $N_{sb}(x) := A_{sb} \cdot E_s \cdot \epsilon(d_b, x)$

kracht in onderwapening $N_{so}(x) := A_{so} \cdot E_s \cdot \epsilon(d_o, x)$

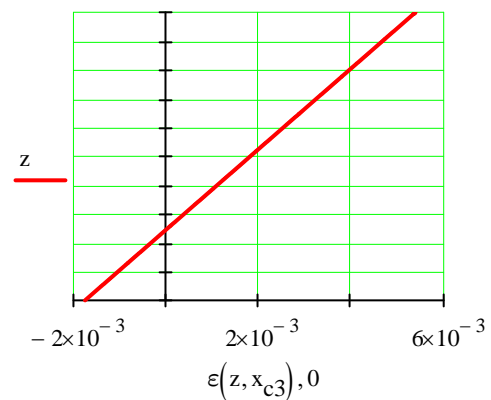
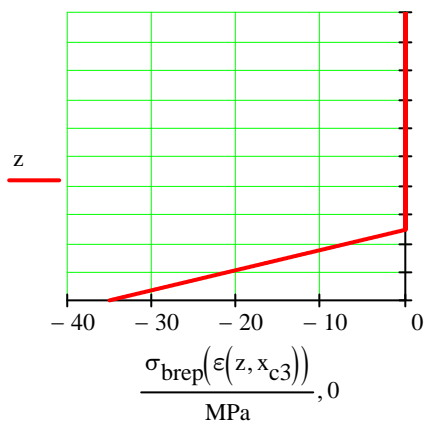
schatwaarde drukzonehoogte $x := 0.5 \cdot h$

Given

$$N'_b(x) + N_{sb}(x) + N_{so}(x) = 0$$

$$x_{c3} := \text{Find}(x) \quad x_{c3} = 41.7 \cdot \text{mm}$$

$$z := 0 \text{mm}, 0.1 \text{mm} \dots h$$



drukkracht beton $N'_b(x_{c3}) = -729 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

kromming $\kappa_{c3} := \frac{-\epsilon_{c3}}{x_{c3}} = 0.042 \frac{1}{\text{m}}$

normaalkracht in bovenwapening $N_{sb}(x_{c3}) = 765 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$ $\sigma_{c3} := \frac{N_{sb}(x_{c3})}{A_{sb}} = 507 \cdot \text{MPa}$

representatief moment

$$M_{c3} := \int_0^h \sigma_{brep}(\epsilon(z, x_{rep})) \cdot z dz + d_o \cdot N_{so}(x_{rep}) + d_b \cdot N_{sb}(x_{rep})$$

$M_{c3} = 85.1 \cdot \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$

lineaire relatie tussen kromming en staalspanning

$$\sigma_{s\kappa}(\kappa) := \frac{\kappa}{\kappa_{c3}} \cdot \sigma_{c3}$$

lineaire relatie tussen moment en staalspanning

$$\sigma_{sM}(M) := \frac{M}{M_{c3}} \cdot \sigma_{c3}$$

lineaire relatie tussen kromming en betondrukspanning

$$\sigma_{b\kappa}(\kappa) := \frac{\kappa}{\kappa_{c3}} \cdot f_{ck}$$

lineaire relatie tussen moment en betondrukspanning

$$\sigma_{bM}(M) := \frac{M}{M_{c3}} \cdot f_{ck}$$

5.2 Vermoeingsbelasting

hoekverdraaiing door TS1 in aangrenzend veld
in het hart van de rijstrook voor zwaar verkeer

$$\phi_{TS1} = 1.9 \cdot \text{mrad}$$

bijbehorende overspanning aangrenzend veld

$$L_{\text{veld}} = 21 \text{ m}$$

equivalente buigstijfheid aansluitend veld

$$EI_{\text{veld}} := \frac{600 \text{ kN} \cdot L_{\text{veld}}^2}{16 \cdot \phi_{TS1}} = 8.70 \times 10^6 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^2$$

afmetingen wielprenten

type A

$$a_A := 0.3 \text{ m} + 2 \cdot 0.12 \text{ m} + h = 0.71 \text{ m}$$

(ROK Tabel 5-7)

$$b_A := 0.25 \text{ m} + 2 \cdot 0.12 \text{ m} + h = 0.66 \text{ m}$$

type B

$$a_B := a_A = 0.71 \text{ m}$$

$$b_B := 0.25 \text{ m} + 0.1 \text{ m} + 0.25 \text{ m} + 2 \cdot 0.12 \text{ m} + h = 1.01 \text{ m}$$

type C

$$a_C := a_A = 0.71 \text{ m}$$

$$b_C := 0.333 \text{ m} + 2 \cdot 0.12 \text{ m} + h = 0.743 \text{ m}$$

belaste lengte van de voeg

$$a := \min(L_t, a_A) \quad a = 0.71 \text{ m}$$

Voertuigtype 1 (ROK tabel 5-7)

aantal passages over ontwerplevensduur

$$n_1 := 750000 \cdot t_{\text{ref}} = 3.75 \times 10^7$$

aslasten en afmetingen wielprenten

$$i := 0..1$$

$$Q := \begin{pmatrix} 70 \\ 130 \end{pmatrix} \text{ kN} \quad x := \begin{pmatrix} a_A \\ a_B \end{pmatrix} \quad y := \begin{pmatrix} b_A \\ b_B \end{pmatrix}$$

spanningswisselingen door aslasten op voeg

$$p_i := \frac{0.5 \cdot Q_i}{x_i \cdot y_i}$$

$$M_i := \frac{1}{12} \cdot p_i \cdot a^2 \cdot \frac{(6 \cdot L_t^2 - 8 \cdot a \cdot L_t + 3 \cdot a^2)}{L_t^2}$$

$$\sigma_{s_i} := \xi_1 \cdot \sigma_{sM}(M_i) \quad \sigma_s = \begin{pmatrix} 27.5 \\ 33.3 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{b_i} := \xi_1 \cdot \sigma_{bM}(M_i) \quad \sigma_b = \begin{pmatrix} 1.9 \\ 2.3 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

equivalent voertuiggewicht

$$Q_{\text{tot}} := \sum Q = 200 \cdot \text{kN}$$

afstand tussen eerste en laatste as

$$L_{\text{voertuig}} := 4.50 \text{ m}$$

equivalente lijnlast over lengte a

$$q := \frac{Q_{\text{tot}}}{L_{\text{voertuig}}} = 44.4 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

belaste lengte van veld

$$L_{\text{bel}} := \min(L_{\text{voertuig}}, L_{\text{veld}}) = 4.5 \text{ m}$$

hoekverdraaiing vanuit aangrenzend veld

$$\phi := \frac{1}{48} \cdot \frac{q \cdot L_{\text{bel}} \cdot (3 \cdot L_{\text{veld}}^2 - L_{\text{bel}}^2)}{EI_{\text{veld}}} = 0.62 \cdot \text{mrad}$$

kromming en staalspanning

$$\kappa := \xi_2 \cdot \frac{4 \cdot \phi}{L_t}$$

$$\sigma_{s\kappa}(\kappa) = 34.6 \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{s\text{rows}}(\sigma_s) := \sigma_{s\kappa}(\kappa)$$

$$\sigma_{b\kappa}(\kappa) = 2.4 \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{b\text{rows}}(\sigma_b) := \sigma_{b\kappa}(\kappa)$$

resume spanningswisselingen voertuigtype 1

$$\sigma_{s1} := \sigma_s = \begin{pmatrix} 27.5 \\ 33.3 \\ 34.6 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{b1} := \sigma_b = \begin{pmatrix} 1.9 \\ 2.3 \\ 2.4 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

Voertuigtype 2 (ROK tabel 5-7)

aantal passages over ontwerplevensduur

$$n_2 := 600000 \cdot t_{\text{ref}} = 3 \times 10^7$$

aslasten en afmetingen wielprenten

$$i := 0..2$$

$$Q := \begin{pmatrix} 70 \\ 120 \\ 120 \end{pmatrix} \text{ kN} \quad x := \begin{pmatrix} a_A \\ a_B \\ a_B \end{pmatrix} \quad y := \begin{pmatrix} b_A \\ b_B \\ b_B \end{pmatrix}$$

spanningswisselingen door aslasten op voeg

$$p_i := \frac{0.5 \cdot Q_i}{x_i \cdot y_i}$$

$$M_i := \frac{1}{12} \cdot p_i \cdot a^2 \cdot \frac{[6 \cdot (L_t)^2 - 8 \cdot a \cdot L_t + 3 \cdot a^2]}{L_t^2}$$

$$\sigma_s := 0$$

$$\sigma_{s_i} := \xi_1 \cdot \sigma_{sM}(M_i) \quad \sigma_s = \begin{pmatrix} 27.5 \\ 30.8 \\ 30.8 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_b := 0$$

$$\sigma_{b_i} := \xi_1 \cdot \sigma_{bM}(M_i) \quad \sigma_b = \begin{pmatrix} 1.9 \\ 2.1 \\ 2.1 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

equivalent voertuiggewicht

$$Q_{\text{tot}} := \sum Q = 310 \cdot \text{kN}$$

afstand tussen eerste en laatste as

$$L_{\text{voertuig}} := (4.2 + 1.3) \text{ m} = 5.5 \text{ m}$$

equivalente lijnlast over lengte a

$$q := \frac{Q_{\text{tot}}}{L_{\text{voertuig}}} = 56.4 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

belaste lengte van veld

$$L_{\text{bel}} := \min(L_{\text{voertuig}}, L_{\text{veld}}) = 5.5 \text{ m}$$

hoekverdraaiing vanuit aangrenzend veld

$$\phi := \frac{1}{48} \cdot \frac{q \cdot L_{\text{bel}} \cdot \left(3 \cdot L_{\text{veld}}^2 - L_{\text{bel}}^2\right)}{EI_{\text{veld}}} = 0.96 \cdot \text{mrad}$$

kromming en staalspanning

$$\kappa := \xi_2 \cdot \frac{4 \cdot \phi}{L_t}$$

$$\sigma_{s\kappa}(\kappa) = 53.2 \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{s\text{rows}}(\sigma_s) := \sigma_{s\kappa}(\kappa)$$

$$\sigma_{b\kappa}(\kappa) = 3.7 \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{b\text{rows}}(\sigma_b) := \sigma_{b\kappa}(\kappa)$$

resume spanningswisselingen voertuigtype 2

$$\sigma_{s2} := \sigma_s = \begin{pmatrix} 27.5 \\ 30.8 \\ 30.8 \\ 53.2 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{b2} := \sigma_b = \begin{pmatrix} 1.9 \\ 2.1 \\ 2.1 \\ 3.7 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

Voertuigtype 3 (ROK tabel 5-7)

aantal passages over ontwerplevensduur

$$n_3 := 600000 \cdot t_{\text{ref}} = 3 \times 10^7$$

aslasten en afmetingen wielprenten

$$i := 0..4$$

$$Q := \begin{pmatrix} 70 \\ 150 \\ 90 \\ 90 \\ 90 \end{pmatrix} \text{ kN} \quad x := \begin{pmatrix} a_A \\ a_B \\ a_C \\ a_C \\ a_C \end{pmatrix} \quad y := \begin{pmatrix} b_A \\ b_B \\ b_C \\ b_C \\ b_C \end{pmatrix}$$

spanningswisselingen door aslasten op voeg

$$p_i := \frac{0.5 \cdot Q_i}{x_i \cdot y_i}$$

$$M_i := \frac{1}{12} \cdot p_i \cdot a^2 \cdot \frac{\left(6 \cdot L_t^2 - 8 \cdot a \cdot L_t + 3 \cdot a^2\right)}{\left(L_t\right)^2}$$

$$\sigma_s := 0 \quad \sigma_{s_i} := \xi_1 \cdot \sigma_{sM}(M_i) \quad \sigma_s = \begin{pmatrix} 27.5 \\ 38.5 \\ 31.4 \\ 31.4 \\ 31.4 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_b := 0 \quad \sigma_{b_i} := \xi_1 \cdot \sigma_{bM}(M_i) \quad \sigma_b = \begin{pmatrix} 1.9 \\ 2.7 \\ 2.2 \\ 2.2 \\ 2.2 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

equivalent voertuiggewicht

$$Q_{\text{tot}} := \sum Q = 490 \cdot \text{kN}$$

afstand tussen eerste en laatste as

$$L_{\text{voertuig}} := 3.2\text{m} + 5.2\text{m} + 1.3\text{m} + 1.3\text{m} = 11\text{m}$$

equivalente lijnlast over lengte a

$$q := \frac{Q_{\text{tot}}}{L_{\text{voertuig}}} = 44.5 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

belaste lengte van veld

$$L_{\text{bel}} := \min(L_{\text{voertuig}}, L_{\text{veld}}) = 11\text{m}$$

hoekverdraaiing vanuit aangrenzend veld

$$\phi := \frac{1}{48} \cdot \frac{q \cdot L_{\text{bel}} \cdot (3 \cdot L_{\text{veld}}^2 - L_{\text{bel}}^2)}{EI_{\text{veld}}} = 1.41 \cdot \text{mrad}$$

kromming en staalspanning

$$\kappa := \xi_2 \cdot \frac{4 \cdot \phi}{L_t}$$

$$\sigma_{s\kappa}(\kappa) = 78.2 \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{s\text{rows}}(\sigma_s) := \sigma_{s\kappa}(\kappa)$$

$$\sigma_{b\kappa}(\kappa) = 5.4 \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{b\text{rows}}(\sigma_b) := \sigma_{b\kappa}(\kappa)$$

resume spanningswisselingen voertuigtype 3

$$\sigma_{s3} := \sigma_s = \begin{pmatrix} 27.5 \\ 38.5 \\ 31.4 \\ 31.4 \\ 31.4 \\ 78.2 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{b3} := \sigma_b = \begin{pmatrix} 1.9 \\ 2.7 \\ 2.2 \\ 2.2 \\ 2.2 \\ 5.4 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

Voertuigtype 4 (ROK tabel 5-7)

aantal passages over ontwerplevensduur

$$n_4 := 230000 \cdot t_{\text{ref}} = 1.15 \times 10^7$$

aslasten en afmetingen wielprenten

$$i := 0..7$$

$$Q := \begin{pmatrix} 70 \\ 90 \\ 70 \\ 70 \\ 70 \\ 70 \\ 70 \\ 70 \end{pmatrix} \text{ kN} \quad x := \begin{pmatrix} a_A \\ a_C \\ a_A \\ a_A \\ a_A \\ a_A \\ a_A \\ a_A \end{pmatrix} \quad y := \begin{pmatrix} b_A \\ b_C \\ b_A \\ b_A \\ b_A \\ b_A \\ b_A \\ b_A \end{pmatrix}$$

spanningswisselingen door aslasten op voeg

$$p_i := \frac{0.5 \cdot Q_i}{x_i \cdot y_i}$$

$$M_i := \frac{1}{12} \cdot p_i \cdot a^2 \cdot \frac{(6 \cdot L_t^2 - 8 \cdot a \cdot L_t + 3 \cdot a^2)}{L_t^2}$$

$$\sigma_s := 0$$

$$\sigma_{s_i} := \xi_1 \cdot \sigma_{sM}(M_i) \quad \sigma_s = \begin{pmatrix} 27.5 \\ 31.4 \\ 27.5 \\ 27.5 \\ 27.5 \\ 27.5 \\ 27.5 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_b := 0$$

$$\sigma_{b_i} := \xi_1 \cdot \sigma_{bM}(M_i) \quad \sigma_b = \begin{pmatrix} 1.9 \\ 2.2 \\ 1.9 \\ 1.9 \\ 1.9 \\ 1.9 \\ 1.9 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

equivalent voertuiggewicht

$$Q_{\text{tot}} := \sum Q = 580 \cdot \text{kN}$$

afstand tussen eerste en laatste as

$$L_{\text{voertuig}} := (3.2 + 1.3 + 4.4 + 1.3 + 1.3 + 1.3 + 1.3) \text{m}$$

$$L_{\text{voertuig}} = 14.1 \text{ m}$$

equivalente lijnlast over lengte a

$$q := \frac{Q_{\text{tot}}}{L_{\text{voertuig}}} = 41.1 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

belaste lengte van veld

$$L_{\text{bel}} := \min(L_{\text{voertuig}}, L_{\text{veld}}) = 14.1 \text{ m}$$

hoekverdraaiing vanuit aangrenzend veld

$$\phi := \frac{1}{48} \cdot \frac{q \cdot L_{\text{bel}} \cdot (3 \cdot L_{\text{veld}}^2 - L_{\text{bel}}^2)}{EI_{\text{veld}}} = 1.56 \cdot \text{mrad}$$

kromming en staalspanning

$$\kappa := \xi_2 \cdot \frac{4 \cdot \phi}{L_t}$$

$$\sigma_{s\kappa}(\kappa) = 86.6 \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{s\text{rows}}(\sigma_s) := \sigma_{s\kappa}(\kappa)$$

$$\sigma_{b\kappa}(\kappa) = 6.0 \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{b\text{rows}}(\sigma_b) := \sigma_{b\kappa}(\kappa)$$

resume spanningswisselingen voertuigtype 4

$$\sigma_{s4} := \sigma_s = \begin{pmatrix} 27.5 \\ 31.4 \\ 27.5 \\ 27.5 \\ 27.5 \\ 27.5 \\ 27.5 \\ 86.6 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{b4} := \sigma_b = \begin{pmatrix} 1.9 \\ 2.2 \\ 1.9 \\ 1.9 \\ 1.9 \\ 1.9 \\ 1.9 \\ 6 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

Voertuigtype 5 (ROK tabel 5-7)

aantal passages over ontwerplevensduur

$$n_5 := 66000 \cdot t_{\text{ref}} = 3.3 \times 10^6$$

aslasten en afmetingen wielprenten

$$i := 0..7$$

$$Q := \begin{pmatrix} 70 \\ 70 \\ 170 \\ 160 \\ 70 \\ 70 \\ 70 \\ 70 \end{pmatrix} \text{ kN} \quad x := \begin{pmatrix} a_A \\ a_A \\ a_B \\ a_B \\ a_A \\ a_A \\ a_A \\ a_A \end{pmatrix} \quad y := \begin{pmatrix} b_A \\ b_A \\ b_B \\ b_B \\ b_A \\ b_A \\ b_A \\ b_A \end{pmatrix}$$

spanningswisselingen door aslasten op voeg

$$p_i := \frac{0.5 \cdot Q_i}{x_i \cdot y_i}$$

$$M_i := \frac{1}{12} \cdot p_i \cdot a^2 \cdot \frac{(6 \cdot L_t^2 - 8 \cdot a \cdot L_t + 3 \cdot a^2)}{(L_t)^2}$$

$$\sigma_s := 0 \quad \sigma_{s_i} := \xi_1 \cdot \sigma_{sM}(M_i) \quad \sigma_s = \begin{pmatrix} 27.5 \\ 27.5 \\ 43.6 \\ 41.0 \\ 27.5 \\ 27.5 \\ 27.5 \\ 27.5 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_b := 0 \quad \sigma_{b_i} := \xi_1 \cdot \sigma_{bM}(M_i) \quad \sigma_b = \begin{pmatrix} 1.9 \\ 1.9 \\ 3.0 \\ 2.8 \\ 1.9 \\ 1.9 \\ 1.9 \\ 1.9 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

equivalent voertuiggewicht

$$Q_{\text{tot}} := \sum Q = 750 \cdot \text{kN}$$

afstand tussen eerste en laatste as

$$L_{\text{voertuig}} := (1.5 + 2.4 + 1.3 + 9.5 + 1.3 + 1.3 + 1.3) \text{ m}$$

$$L_{\text{voertuig}} = 18.6 \text{ m}$$

equivalente lijnlast over lengte a

$$q := \frac{Q_{\text{tot}}}{L_{\text{voertuig}}} = 40.3 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

belaste lengte van veld

$$L_{\text{bel}} := \min(L_{\text{voertuig}}, L_{\text{veld}}) = 18.6 \text{ m}$$

hoekverdraaiing vanuit aangrenzend veld

$$\phi := \frac{1}{48} \cdot \frac{q \cdot L_{\text{bel}} \cdot (3 \cdot L_{\text{veld}}^2 - L_{\text{bel}}^2)}{EI_{\text{veld}}} = 1.75 \cdot \text{mrad}$$

kromming en staalspanning

$$\kappa := \xi_2 \cdot \frac{4 \cdot \phi}{L_t}$$

$$\sigma_{s\kappa}(\kappa) = 97.3 \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{s\text{rows}}(\sigma_s) := \sigma_{s\kappa}(\kappa)$$

$$\sigma_{b\kappa}(\kappa) = 6.7 \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{b\text{rows}}(\sigma_b) := \sigma_{b\kappa}(\kappa)$$

resume spanningswisselingen voertuigtype 5

$$\sigma_{s5} := \sigma_s = \begin{pmatrix} 27.5 \\ 27.5 \\ 43.6 \\ 41.0 \\ 27.5 \\ 27.5 \\ 27.5 \\ 27.5 \\ 97.3 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{b5} := \sigma_b = \begin{pmatrix} 1.9 \\ 1.9 \\ 3 \\ 2.8 \\ 1.9 \\ 1.9 \\ 1.9 \\ 1.9 \\ 6.7 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

Voertuigtype 6 (ROK tabel 5-7)

aantal passages over ontwerplevensduur

$$n_6 := 3100 \cdot t_{\text{ref}} = 1.55 \times 10^5$$

aslasten en afmetingen wielprenten

$$i := 0..6$$

$$Q := \begin{pmatrix} 70 \\ 70 \\ 180 \\ 190 \\ 70 \\ 180 \\ 190 \end{pmatrix} \text{ kN} \quad x := \begin{pmatrix} a_A \\ a_A \\ a_B \\ a_B \\ a_A \\ a_B \\ a_B \end{pmatrix} \quad y := \begin{pmatrix} b_A \\ b_A \\ b_B \\ b_B \\ b_A \\ b_B \\ b_B \end{pmatrix}$$

spanningswisselingen door aslasten op voeg

$$p_i := \frac{0.5 \cdot Q_i}{x_i \cdot y_i}$$

$$M_i := \frac{1}{12} \cdot p_i \cdot a^2 \cdot \frac{(6 \cdot L_t^2 - 8 \cdot a \cdot L_t + 3 \cdot a^2)}{L_t^2}$$

$$\sigma_s := 0 \quad \sigma_{s_i} := \xi_1 \cdot \sigma_{sM}(M_i) \quad \sigma_s = \begin{pmatrix} 27.5 \\ 27.5 \\ 46.2 \\ 48.7 \\ 27.5 \\ 46.2 \\ 48.7 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_b := 0 \quad \sigma_{b_i} := \xi_1 \cdot \sigma_{bM}(M_i) \quad \sigma_b = \begin{pmatrix} 1.9 \\ 1.9 \\ 3.2 \\ 3.4 \\ 1.9 \\ 3.2 \\ 3.4 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

equivalent voertuiggewicht

$$Q_{\text{tot}} := \sum Q = 950 \cdot \text{kN}$$

afstand tussen eerste en laatste as

$$L_{\text{voertuig}} := (1.7 + 3.3 + 1.3 + 3.5 + 3.5 + 1.3) \text{m}$$

$$L_{\text{voertuig}} = 14.6 \text{ m}$$

equivalente lijnlast over lengte a

$$q := \frac{Q_{\text{tot}}}{L_{\text{voertuig}}} = 65.1 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

belaste lengte van veld

$$L_{\text{bel}} := \min(L_{\text{voertuig}}, L_{\text{veld}}) = 14.6 \text{ m}$$

hoekverdraaiing vanuit aangrenzend veld

$$\phi := \frac{1}{48} \cdot \frac{q \cdot L_{\text{bel}} \cdot (3 \cdot L_{\text{veld}}^2 - L_{\text{bel}}^2)}{EI_{\text{veld}}} = 2.52 \cdot \text{mrad}$$

kromming en staalspanning

$$\kappa := \xi_2 \cdot \frac{4 \cdot \phi}{L_t} \quad \sigma_{s\kappa}(\kappa) = 140.0 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{s\kappa}(\kappa) = 140.0 \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{s\text{rows}}(\sigma_s) := \sigma_{s\kappa}(\kappa)$$

$$\sigma_{b\kappa}(\kappa) = 9.7 \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{b\text{rows}}(\sigma_b) := \sigma_{b\kappa}(\kappa)$$

resume spanningswisselingen voertuigtype 6

$$\sigma_{s6} := \sigma_s = \begin{pmatrix} 27.5 \\ 27.5 \\ 46.2 \\ 48.7 \\ 27.5 \\ 46.2 \\ 48.7 \\ 140.0 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{b6} := \sigma_b = \begin{pmatrix} 1.9 \\ 1.9 \\ 3.2 \\ 3.4 \\ 1.9 \\ 3.2 \\ 3.4 \\ 9.7 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

Voertuigtype 7 (ROK tabel 5-7)

aantal passages over ontwerplevensduur

$$n_7 := 500 \cdot t_{\text{ref}} = 2.5 \times 10^4$$

aslasten en afmetingen wielprenten

$$i := 0..5$$

$$Q := \begin{pmatrix} 170 \\ 170 \\ 200 \\ 180 \\ 180 \\ 190 \end{pmatrix} \text{ kN} \quad x := \begin{pmatrix} a_B \\ a_B \\ a_B \\ a_B \\ a_B \\ a_B \end{pmatrix} \quad y := \begin{pmatrix} b_B \\ b_B \\ b_B \\ b_B \\ b_B \\ b_B \end{pmatrix}$$

spanningswisselingen door aslasten op voeg

$$p_i := \frac{0.5 \cdot Q_i}{x_i \cdot y_i}$$

$$M_i := \frac{1}{12} \cdot p_i \cdot a^2 \cdot \frac{(6 \cdot L_t^2 - 8 \cdot a \cdot L_t + 3 \cdot a^2)}{L_t^2}$$

$$\sigma_s := 0 \quad \sigma_{s_i} := \xi_1 \cdot \sigma_{sM}(M_i) \quad \sigma_s = \begin{pmatrix} 43.6 \\ 43.6 \\ 51.3 \\ 46.2 \\ 46.2 \\ 48.7 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_b := 0 \quad \sigma_{b_i} := \xi_1 \cdot \sigma_{bM}(M_i) \quad \sigma_b = \begin{pmatrix} 3.0 \\ 3.0 \\ 3.5 \\ 3.2 \\ 3.2 \\ 3.4 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

equivalent voertuiggewicht

$$Q_{\text{tot}} := \sum Q = 1090 \cdot \text{kN}$$

afstand tussen eerste en laatste as

$$L_{\text{voertuig}} := (2.4 + 1.3 + 5.5 + 1.3 + 1.3) \text{ m} = 11.8 \text{ m}$$

equivalente lijnlast over lengte a

$$q := \frac{Q_{\text{tot}}}{L_{\text{voertuig}}} = 92.4 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

belaste lengte van veld

$$L_{\text{bel}} := \min(L_{\text{voertuig}}, L_{\text{veld}}) = 11.8 \text{ m}$$

hoekverdraaiing vanuit aangrenzend veld

$$\phi := \frac{1}{48} \cdot \frac{q \cdot L_{\text{bel}} \cdot (3 \cdot L_{\text{veld}}^2 - L_{\text{bel}}^2)}{EI_{\text{veld}}} = 3.09 \cdot \text{mrad}$$

kromming en staalspanning

$$\kappa := \xi_2 \cdot \frac{4 \cdot \phi}{L_t}$$

$$\sigma_{s\kappa}(\kappa) = 171.4 \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{s\text{rows}}(\sigma_s) := \sigma_{s\kappa}(\kappa)$$

$$\sigma_{b\kappa}(\kappa) = 11.8 \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{b\text{rows}}(\sigma_b) := \sigma_{b\kappa}(\kappa)$$

resume spanningswisselingen voertuigtype 7

$$\sigma_{s7} := \sigma_s = \begin{pmatrix} 43.6 \\ 43.6 \\ 51.3 \\ 46.2 \\ 46.2 \\ 48.7 \\ 171.4 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{b7} := \sigma_b = \begin{pmatrix} 3.0 \\ 3.0 \\ 3.5 \\ 3.2 \\ 3.2 \\ 3.4 \\ 11.8 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

Voertuigtype 8 (ROK tabel 5-7)

aantal passages over ontwerplevensduur

$$n_8 := 200 \cdot t_{\text{ref}} = 1 \times 10^4$$

aslasten en afmetingen wielprenten

$$i := 0..6$$

$$Q := \begin{pmatrix} 130 \\ 160 \\ 170 \\ 220 \\ 200 \\ 170 \\ 170 \end{pmatrix} \text{ kN} \quad x := \begin{pmatrix} a_B \\ a_B \\ a_B \\ a_B \\ a_B \\ a_B \\ a_B \end{pmatrix} \quad y := \begin{pmatrix} b_B \\ b_B \\ b_B \\ b_B \\ b_B \\ b_B \\ b_B \end{pmatrix}$$

spanningswisselingen door aslasten op voeg

$$p_i := \frac{0.5 \cdot Q_i}{x_i \cdot y_i}$$

$$M_i := \frac{1}{12} \cdot p_i \cdot a^2 \cdot \frac{(6 \cdot L_t^2 - 8 \cdot a \cdot L_t + 3 \cdot a^2)}{L_t^2}$$

$$\sigma_s := 0$$

$$\sigma_{s_i} := \xi_1 \cdot \sigma_{sM}(M_i) \quad \sigma_s = \begin{pmatrix} 33.3 \\ 41.0 \\ 43.6 \\ 56.4 \\ 51.3 \\ 43.6 \\ 43.6 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_b := 0$$

$$\sigma_{b_i} := \xi_1 \cdot \sigma_{bM}(M_i) \quad \sigma_b = \begin{pmatrix} 2.3 \\ 2.8 \\ 3.0 \\ 3.9 \\ 3.5 \\ 3.0 \\ 3.0 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

equivalent voertuiggewicht

$$Q_{\text{tot}} := \sum Q = 1220 \cdot \text{kN}$$

afstand tussen eerste en laatste as

$$L_{\text{voertuig}} := (2.5 + 1.3 + 5.2 + 1.3 + 1.3 + 1.3) \text{m} = 12.9 \text{m}$$

equivalente lijnlast over lengte a

$$q := \frac{Q_{\text{tot}}}{L_{\text{voertuig}}} = 94.6 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

belaste lengte van veld

$$L_{\text{bel}} := \min(L_{\text{voertuig}}, L_{\text{veld}}) = 12.9 \text{m}$$

hoekverdraaiing vanuit aangrenzend veld

$$\phi := \frac{1}{48} \cdot \frac{q \cdot L_{\text{bel}} \cdot (3 \cdot L_{\text{veld}}^2 - L_{\text{bel}}^2)}{EI_{\text{veld}}} = 3.38 \cdot \text{mrad}$$

kromming en staalspanning

$$\kappa := \xi_2 \cdot \frac{4 \cdot \phi}{L_t}$$

$$\sigma_{s\kappa}(\kappa) = 187.4 \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{s\text{rows}}(\sigma_s) := \sigma_{s\kappa}(\kappa)$$

$$\sigma_{b\kappa}(\kappa) = 12.9 \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{b\text{rows}}(\sigma_b) := \sigma_{b\kappa}(\kappa)$$

resume spanningswisselingen voertuigtype 8

$$\sigma_{s8} := \sigma_s = \begin{pmatrix} 33.3 \\ 41.0 \\ 43.6 \\ 56.4 \\ 51.3 \\ 43.6 \\ 43.6 \\ 187.4 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{b8} := \sigma_b = \begin{pmatrix} 2.3 \\ 2.8 \\ 3.0 \\ 3.9 \\ 3.5 \\ 3.0 \\ 3.0 \\ 12.9 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

Voertuigtype 9 (ROK tabel 5-7)

aantal passages over ontwerplevensduur

$$n_9 := 100 \cdot t_{\text{ref}} = 5 \times 10^3$$

aslasten en afmetingen wielprenten

$$i := 0..6$$

$$Q := \begin{pmatrix} 130 \\ 130 \\ 180 \\ 180 \\ 220 \\ 220 \\ 220 \end{pmatrix} \text{ kN} \quad x := \begin{pmatrix} a_B \\ a_B \\ a_B \\ a_B \\ a_B \\ a_B \\ a_B \end{pmatrix} \quad y := \begin{pmatrix} b_B \\ b_B \\ b_B \\ b_B \\ b_B \\ b_B \\ b_B \end{pmatrix}$$

spanningswisselingen door aslasten op voeg

$$p_i := \frac{0.5 \cdot Q_i}{x_i \cdot y_i}$$

$$M_i := \frac{1}{12} \cdot p_i \cdot a^2 \cdot \frac{(6 \cdot L_t^2 - 8 \cdot a \cdot L_t + 3 \cdot a^2)}{L_t^2}$$

$$\sigma_s := 0$$

$$\sigma_{s_i} := \xi_1 \cdot \sigma_{sM}(M_i) \quad \sigma_s = \begin{pmatrix} 33.3 \\ 33.3 \\ 46.2 \\ 46.2 \\ 56.4 \\ 56.4 \\ 56.4 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_b := 0$$

$$\sigma_{b_i} := \xi_1 \cdot \sigma_{bM}(M_i) \quad \sigma_b = \begin{pmatrix} 2.3 \\ 2.3 \\ 3.2 \\ 3.2 \\ 3.9 \\ 3.9 \\ 3.9 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

equivalent voertuiggewicht

$$Q_{\text{tot}} := \sum Q = 1280 \cdot \text{kN}$$

afstand tussen eerste en laatste as

$$L_{\text{voertuig}} := (1.4 + 2.6 + 1.3 + 6.1 + 1.9 + 1.9) \text{m} = 15.2 \text{m}$$

equivalente lijnlast over lengte a

$$q := \frac{Q_{\text{tot}}}{L_{\text{voertuig}}} = 84.2 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

belaste lengte van veld

$$L_{\text{bel}} := \min(L_{\text{voertuig}}, L_{\text{veld}}) = 15.2 \text{m}$$

hoekverdraaiing vanuit aangrenzend veld

$$\phi := \frac{1}{48} \cdot \frac{q \cdot L_{\text{bel}} \cdot (3 \cdot L_{\text{veld}}^2 - L_{\text{bel}}^2)}{EI_{\text{veld}}} = 3.35 \cdot \text{mrad}$$

kromming en staalspanning

$$\kappa := \xi_2 \cdot \frac{4 \cdot \phi}{L_t}$$

$$\sigma_{s\kappa}(\kappa) = 185.7 \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{s\text{rows}}(\sigma_s) := \sigma_{s\kappa}(\kappa)$$

$$\sigma_{b\kappa}(\kappa) = 12.8 \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{b\text{rows}}(\sigma_b) := \sigma_{b\kappa}(\kappa)$$

resume spanningswisselingen voertuigtype 9

$$\sigma_{s9} := \sigma_s = \begin{pmatrix} 33.3 \\ 33.3 \\ 46.2 \\ 46.2 \\ 56.4 \\ 56.4 \\ 56.4 \\ 185.7 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{b9} := \sigma_b = \begin{pmatrix} 2.3 \\ 2.3 \\ 3.2 \\ 3.2 \\ 3.9 \\ 3.9 \\ 3.9 \\ 12.8 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

Voertuigtype 10 (ROK tabel 5-7)

aantal passages over ontwerplevensduur

$$n_{10} := 100 \cdot t_{\text{ref}} = 5 \times 10^3$$

aslasten en afmetingen wielprenten

$$i := 0..6$$

$$Q := \begin{pmatrix} 90 \\ 90 \\ 240 \\ 220 \\ 200 \\ 180 \\ 190 \\ 200 \end{pmatrix} \text{ kN} \quad x := \begin{pmatrix} a_C \\ a_C \\ a_B \\ a_B \\ a_B \\ a_B \\ a_B \\ a_B \end{pmatrix} \quad y := \begin{pmatrix} b_C \\ b_C \\ b_B \\ b_B \\ b_B \\ b_B \\ b_B \\ b_B \end{pmatrix}$$

spanningswisselingen door aslasten op voeg

$$p_i := \frac{0.5 \cdot Q_i}{x_i \cdot y_i}$$

$$M_i := \frac{1}{12} \cdot p_i \cdot a^2 \cdot \frac{(6 \cdot L_t^2 - 8 \cdot a \cdot L_t + 3 \cdot a^2)}{L_t^2}$$

$$\sigma_s := 0 \quad \sigma_{s_i} := \xi_1 \cdot \sigma_{sM}(M_i) \quad \sigma_s = \begin{pmatrix} 31.4 \\ 31.4 \\ 61.5 \\ 56.4 \\ 51.3 \\ 46.2 \\ 48.7 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_b := 0 \quad \sigma_{b_i} := \xi_1 \cdot \sigma_{bM}(M_i) \quad \sigma_b = \begin{pmatrix} 2.2 \\ 2.2 \\ 4.2 \\ 3.9 \\ 3.5 \\ 3.2 \\ 3.4 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

equivalent voertuiggewicht

$$Q_{\text{tot}} := \sum Q = 1410 \cdot \text{kN}$$

afstand tussen eerste en laatste as

$$L_{\text{voertuig}} := (2.4 + 1.3 + 1.3 + 9.5 + 1.3 + 1.3 + 1.3) \text{ m}$$

$$L_{\text{voertuig}} = 18.4 \text{ m}$$

equivalente lijnlast over lengte a

$$q := \frac{Q_{\text{tot}}}{L_{\text{voertuig}}} = 76.6 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

belaste lengte van veld

$$L_{\text{bel}} := \min(L_{\text{voertuig}}, L_{\text{veld}}) = 18.4 \text{ m}$$

hoekverdraaiing vanuit aangrenzend veld

$$\phi := \frac{1}{48} \cdot \frac{q \cdot L_{\text{bel}} \cdot (3 \cdot L_{\text{veld}}^2 - L_{\text{bel}}^2)}{EI_{\text{veld}}} = 3.32 \cdot \text{mrad}$$

kromming en staalspanning

$$\kappa := \xi_2 \cdot \frac{4 \cdot \phi}{L_t}$$

$$\sigma_{s\kappa}(\kappa) = 184.4 \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{s\text{rows}}(\sigma_s) := \sigma_{s\kappa}(\kappa)$$

$$\sigma_{b\kappa}(\kappa) = 12.7 \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{b\text{rows}}(\sigma_b) := \sigma_{b\kappa}(\kappa)$$

resume spanningswisselingen voertuigtype 10

$$\sigma_{s10} := \sigma_s = \begin{pmatrix} 31.4 \\ 31.4 \\ 61.5 \\ 56.4 \\ 51.3 \\ 46.2 \\ 48.7 \\ 184.4 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{b10} := \sigma_b = \begin{pmatrix} 2.2 \\ 2.2 \\ 4.2 \\ 3.9 \\ 3.5 \\ 3.2 \\ 3.4 \\ 12.7 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

5.3 Vermoeiingsschade volgens Miner

SN-curve betonstaal
(NEN-EN 1992-1-1, 6.8.4)

NEN-EN 1992-1-1, 6.8.4 en NEN-EN 1992-2, 6.8.7

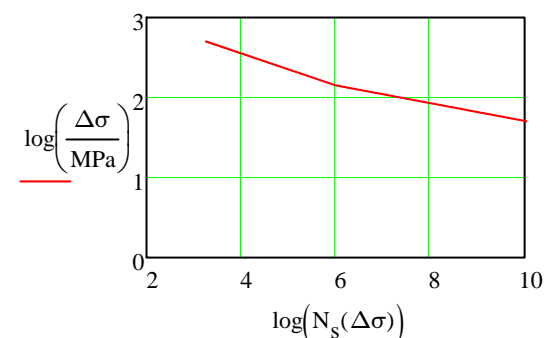
$$k_1 := 5 \quad k_2 := 9$$

$$\Delta\sigma_{Rsk} := 162.5 \text{MPa} \quad \gamma_{s,\text{fat}} := 1.15$$

$$N_{\text{ster}} := 10^6$$

$$N_s(\Delta\sigma) := \begin{cases} \left(\frac{\Delta\sigma_{Rsk}}{\gamma_{s,\text{fat}} \cdot \Delta\sigma} \right)^{k_1} \cdot N_{\text{ster}} & \text{if } \Delta\sigma \geq \frac{\Delta\sigma_{Rsk}}{\gamma_{s,\text{fat}}} \\ \left(\frac{\Delta\sigma_{Rsk}}{\gamma_{s,\text{fat}} \cdot \Delta\sigma} \right)^{k_2} \cdot N_{\text{ster}} & \text{if } \Delta\sigma < \frac{\Delta\sigma_{Rsk}}{\gamma_{s,\text{fat}}} \end{cases}$$

$$\Delta\sigma := 0 \text{MPa}, 1 \text{MPa} \dots f_{yk}$$



SN-curve beton onder druk
(NEN-EN 1992-2, 6.8.7)

$$k_1 := 1.0 \quad \beta_{cc} := 1.0$$

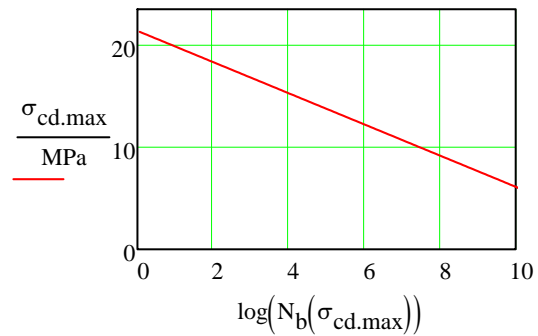
$$f_{cd,\text{fat}} := k_1 \cdot \beta_{cc} \cdot f_{cd} \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{400 \text{MPa}} \right)$$

$$f_{cd.fat} = 21.3 \cdot \text{MPa}$$

De minimale drukspanning is 0 MPa. Hieruit volgt:

$$N_b(\sigma_{cd.max}) := 10 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{cd.max}}{f_{cd.fat}} \right)^{14}$$

$$\sigma_{cd.max} := 0 \text{MPa}, 0.1 \text{MPa} .. f_{cd.fat}$$



Voertuigtype 1

$$n_1 = 3.75 \times 10^7 \quad i := 0..2$$

$$\sigma_{s1} = \begin{pmatrix} 27.5 \\ 33.3 \\ 34.6 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad N_{1_i} := N_s(\sigma_{s1_i}) \quad D_{s1} := \frac{n_1}{N_1} = \begin{pmatrix} 1.49 \times 10^{-5} \\ 8.49 \times 10^{-5} \\ 1.19 \times 10^{-4} \end{pmatrix} \quad \sum D_{s1} = 2.19 \times 10^{-4}$$

$$\sigma_{b1} = \begin{pmatrix} 1.9 \\ 2.3 \\ 2.4 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad N_{1_i} := N_b(\sigma_{b1_i}) \quad D_{b1} := \frac{n_1}{N_1} = \begin{pmatrix} 6.62 \times 10^{-6} \\ 1.22 \times 10^{-5} \\ 1.39 \times 10^{-5} \end{pmatrix} \quad \sum D_{b1} = 3.28 \times 10^{-5}$$

Voertuigtype 2

$$n_2 = 3 \times 10^7 \quad i := 0..3$$

$$\sigma_{s2} = \begin{pmatrix} 27.5 \\ 30.8 \\ 30.8 \\ 53.2 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad N_{2_i} := N_s(\sigma_{s2_i}) \quad D_{s2} := \frac{n_2}{N_2} = \begin{pmatrix} 1.19 \times 10^{-5} \\ 3.3 \times 10^{-5} \\ 3.3 \times 10^{-5} \\ 4.58 \times 10^{-3} \end{pmatrix} \quad \sum D_{s2} = 4.66 \times 10^{-3}$$

$$\sigma_{b2} = \begin{pmatrix} 1.9 \\ 2.1 \\ 2.1 \\ 3.7 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad N_{2_i} := N_b(\sigma_{b2_i}) \quad D_{b2} := \frac{n_2}{N_2} = \begin{pmatrix} 5.29 \times 10^{-6} \\ 7.47 \times 10^{-6} \\ 7.47 \times 10^{-6} \\ 7.81 \times 10^{-5} \end{pmatrix} \quad \sum D_{b2} = 9.84 \times 10^{-5}$$

Voertuigtype 3

$$n_3 = 3 \times 10^7 \quad i := 0..5$$

$$\sigma_{s3} = \begin{pmatrix} 27.5 \\ 38.5 \\ 31.4 \\ 31.4 \\ 31.4 \\ 78.2 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad N_{3_i} := N_s(\sigma_{s3_i}) \quad D_{s3} := \frac{n_3}{N_3} = \begin{pmatrix} 1.19 \times 10^{-5} \\ 2.46 \times 10^{-4} \\ 3.93 \times 10^{-5} \\ 3.93 \times 10^{-5} \\ 3.93 \times 10^{-5} \\ 0.15 \end{pmatrix} \quad \sum D_{s3} = 0.15$$

$$\sigma_{b3} = \begin{pmatrix} 1.9 \\ 2.7 \\ 2.2 \\ 2.2 \\ 2.2 \\ 5.4 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad N_{3_i} := N_b(\sigma_{b3_i}) \quad D_{b3} := \frac{n_3}{N_3} = \begin{pmatrix} 5.29 \times 10^{-6} \\ 1.67 \times 10^{-5} \\ 7.96 \times 10^{-6} \\ 7.96 \times 10^{-6} \\ 7.96 \times 10^{-6} \\ 1.07 \times 10^{-3} \end{pmatrix} \quad \sum D_{b3} = 1.11 \times 10^{-3}$$

Voertuigtype 4

$$n_4 = 1.15 \times 10^8 \quad i := 0..8$$

$$\sigma_{s4} = \begin{pmatrix} 27.5 \\ 31.4 \\ 27.5 \\ 27.5 \\ 27.5 \\ 27.5 \\ 27.5 \\ 27.5 \\ 86.6 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad N_{4_i} := N_s(\sigma_{s4_i}) \quad D_{s4} := \frac{n_4}{N_4} = \begin{pmatrix} 4.56 \times 10^{-6} \\ 1.51 \times 10^{-5} \\ 4.56 \times 10^{-6} \\ 4.56 \times 10^{-6} \\ 4.56 \times 10^{-6} \\ 4.56 \times 10^{-6} \\ 4.56 \times 10^{-6} \\ 4.56 \times 10^{-6} \\ 0.14 \end{pmatrix} \quad \sum D_{s4} = 0.14$$

$$\sigma_{b4} = \begin{pmatrix} 1.9 \\ 2.2 \\ 1.9 \\ 1.9 \\ 1.9 \\ 1.9 \\ 1.9 \\ 1.9 \\ 6.0 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad N_{4_i} := N_b(\sigma_{b4_i}) \quad D_{b4} := \frac{n_4}{N_4} = \begin{pmatrix} 2.03 \times 10^{-6} \\ 3.05 \times 10^{-6} \\ 2.03 \times 10^{-6} \\ 2.03 \times 10^{-6} \\ 2.03 \times 10^{-6} \\ 2.03 \times 10^{-6} \\ 2.03 \times 10^{-6} \\ 2.03 \times 10^{-6} \\ 2.03 \times 10^{-6} \\ 9.79 \times 10^{-4} \end{pmatrix} \quad \sum D_{b4} = 9.97 \times 10^{-4}$$

Voertuigtype 5

$$n_5 = 3.3 \times 10^6 \quad i := 0..8$$

$$\sigma_{s5} = \begin{pmatrix} 27.5 \\ 27.5 \\ 43.6 \\ 41.0 \\ 27.5 \\ 27.5 \\ 27.5 \\ 27.5 \\ 97.3 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad N_{5_i} := N_s(\sigma_{s5_i}) \quad D_{s5} := \frac{n_5}{N_5} = \begin{pmatrix} 1.31 \times 10^{-6} \\ 1.31 \times 10^{-6} \\ 8.36 \times 10^{-5} \\ 4.84 \times 10^{-5} \\ 1.31 \times 10^{-6} \\ 1.31 \times 10^{-6} \\ 1.31 \times 10^{-6} \\ 1.31 \times 10^{-6} \\ 1.31 \times 10^{-6} \\ 0.12 \end{pmatrix} \quad \sum D_{s5} = 0.12$$

$$\sigma_{b5} = \begin{pmatrix} 1.9 \\ 1.9 \\ 3.0 \\ 2.8 \\ 1.9 \\ 1.9 \\ 1.9 \\ 1.9 \\ 6.7 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad N_{5_i} := N_b(\sigma_{b5_i}) \quad D_{b5} := \frac{n_5}{N_5} = \begin{pmatrix} 5.82 \times 10^{-7} \\ 5.82 \times 10^{-7} \\ 3.14 \times 10^{-6} \\ 2.4 \times 10^{-6} \\ 5.82 \times 10^{-7} \\ 5.82 \times 10^{-7} \\ 5.82 \times 10^{-7} \\ 5.82 \times 10^{-7} \\ 5.82 \times 10^{-7} \\ 8.62 \times 10^{-4} \end{pmatrix} \quad \sum D_{b5} = 8.71 \times 10^{-4}$$

Voertuigtype 6

$$n_6 = 1.55 \times 10^5 \quad i := 0..7$$

$$\sigma_{s6} = \begin{pmatrix} 27.5 \\ 27.5 \\ 46.2 \\ 48.7 \\ 27.5 \\ 46.2 \\ 48.7 \\ 140.0 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad N_{6_i} := N_s(\sigma_{s6_i}) \quad D_{s6} := \frac{n_6}{N_6} = \begin{pmatrix} 6.15 \times 10^{-8} \\ 6.15 \times 10^{-8} \\ 6.56 \times 10^{-6} \\ 1.07 \times 10^{-5} \\ 6.15 \times 10^{-8} \\ 6.56 \times 10^{-6} \\ 1.07 \times 10^{-5} \\ 0.14 \end{pmatrix} \quad \sum D_{s6} = 0.14$$

$$\sigma_{b6} = \begin{pmatrix} 1.9 \\ 1.9 \\ 3.2 \\ 3.4 \\ 1.9 \\ 3.2 \\ 3.4 \\ 9.7 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad N_{6_i} := N_b(\sigma_{b6_i}) \quad D_{b6} := \frac{n_6}{N_6} = \begin{pmatrix} 2.73 \times 10^{-8} \\ 2.73 \times 10^{-8} \\ 1.93 \times 10^{-7} \\ 2.52 \times 10^{-7} \\ 2.73 \times 10^{-8} \\ 1.93 \times 10^{-7} \\ 2.52 \times 10^{-7} \\ 3.51 \times 10^{-3} \end{pmatrix} \quad \sum D_{b6} = 3.51 \times 10^{-3}$$

Voertuigtype 7

$$n_7 = 2.5 \times 10^4 \quad i := 0..6$$

$$\sigma_{s7} = \begin{pmatrix} 43.6 \\ 43.6 \\ 51.3 \\ 46.2 \\ 46.2 \\ 48.7 \\ 171.4 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad N_{7_i} := N_s(\sigma_{s7_i}) \quad D_{s7} := \frac{n_7}{N_7} = \begin{pmatrix} 6.33 \times 10^{-7} \\ 6.33 \times 10^{-7} \\ 2.73 \times 10^{-6} \\ 1.06 \times 10^{-6} \\ 1.06 \times 10^{-6} \\ 1.72 \times 10^{-6} \\ 0.07 \end{pmatrix} \quad \sum D_{s7} = 0.07$$

$$\sigma_{b7} = \begin{pmatrix} 3.0 \\ 3.0 \\ 3.5 \\ 3.2 \\ 3.2 \\ 3.4 \\ 11.8 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad N_{7_i} := N_b(\sigma_{b7_i}) \quad D_{b7} := \frac{n_7}{N_7} = \begin{pmatrix} 2.38 \times 10^{-8} \\ 2.38 \times 10^{-8} \\ 5.31 \times 10^{-8} \\ 3.11 \times 10^{-8} \\ 3.11 \times 10^{-8} \\ 4.06 \times 10^{-8} \\ 0.01 \end{pmatrix} \quad \sum D_{b7} = 0.01$$

Voertuigtype 8

$$n_8 = 1 \times 10^4 \quad i := 0..7$$

$$\sigma_{s8} = \begin{pmatrix} 33.3 \\ 41.0 \\ 43.6 \\ 56.4 \\ 51.3 \\ 43.6 \\ 43.6 \\ 187.4 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad N_{8_i} := N_s(\sigma_{s8_i}) \quad D_{s8} := \frac{n_8}{N_8} = \begin{pmatrix} 2.26 \times 10^{-8} \\ 1.47 \times 10^{-7} \\ 2.53 \times 10^{-7} \\ 2.58 \times 10^{-6} \\ 1.09 \times 10^{-6} \\ 2.53 \times 10^{-7} \\ 2.53 \times 10^{-7} \\ 0.04 \end{pmatrix} \quad \sum D_{s8} = 0.04$$

$$\sigma_{b8} = \begin{pmatrix} 2.3 \\ 2.8 \\ 3.0 \\ 3.9 \\ 3.5 \\ 3.0 \\ 3.0 \\ 12.9 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad N_{8_i} := N_b(\sigma_{b8_i}) \quad D_{b8} := \frac{n_8}{N_8} = \begin{pmatrix} 3.26 \times 10^{-9} \\ 7.28 \times 10^{-9} \\ 9.51 \times 10^{-9} \\ 3.63 \times 10^{-8} \\ 2.13 \times 10^{-8} \\ 9.51 \times 10^{-9} \\ 9.51 \times 10^{-9} \\ 0.03 \end{pmatrix} \quad \sum D_{b8} = 0.03$$

Voertuigtype 9

$$n_9 = 5 \times 10^3$$

$$i := 0..7$$

$$\sigma_{s9} = \begin{pmatrix} 33.3 \\ 33.3 \\ 46.2 \\ 46.2 \\ 56.4 \\ 56.4 \\ 56.4 \\ 185.7 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

$$N_{9_i} := N_s(\sigma_{s9_i})$$

$$D_{s9} := \frac{n_9}{N_9} = \begin{pmatrix} 1.13 \times 10^{-8} \\ 1.13 \times 10^{-8} \\ 2.12 \times 10^{-7} \\ 2.12 \times 10^{-7} \\ 1.29 \times 10^{-6} \\ 1.29 \times 10^{-6} \\ 1.29 \times 10^{-6} \\ 0.02 \end{pmatrix}$$

$$\sum D_{s9} = 0.02$$

$$\sigma_{b9} = \begin{pmatrix} 2.3 \\ 2.3 \\ 3.2 \\ 3.2 \\ 3.9 \\ 3.9 \\ 3.9 \\ 12.8 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

$$N_{9_i} := N_b(\sigma_{b9_i})$$

$$D_{b9} := \frac{n_9}{N_9} = \begin{pmatrix} 1.63 \times 10^{-9} \\ 1.63 \times 10^{-9} \\ 6.22 \times 10^{-9} \\ 6.22 \times 10^{-9} \\ 1.82 \times 10^{-8} \\ 1.82 \times 10^{-8} \\ 1.82 \times 10^{-8} \\ 0.01 \end{pmatrix}$$

$$\sum D_{b9} = 0.01$$

Voertuigtype 10

$$n_{10} = 5 \times 10^3$$

$$i := 0..7$$

$$\sigma_{s10} = \begin{pmatrix} 31.4 \\ 31.4 \\ 61.5 \\ 56.4 \\ 51.3 \\ 46.2 \\ 48.7 \\ 184.4 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

$$N_{10_i} := N_s(\sigma_{s10_i})$$

$$D_{s10} := \frac{n_{10}}{N_{10}} = \begin{pmatrix} 6.55 \times 10^{-9} \\ 6.55 \times 10^{-9} \\ 2.82 \times 10^{-6} \\ 1.29 \times 10^{-6} \\ 5.47 \times 10^{-7} \\ 2.12 \times 10^{-7} \\ 3.44 \times 10^{-7} \\ 0.02 \end{pmatrix}$$

$$\sum D_{s10} = 0.02$$

$$\sigma_{b10} = \begin{pmatrix} 2.2 \\ 2.2 \\ 4.2 \\ 3.9 \\ 3.5 \\ 3.2 \\ 3.4 \\ 12.7 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad N_{10_i} := N_b(\sigma_{b10_i}) \quad D_{b10} := \frac{n_{10}}{N_{10}} = \begin{pmatrix} 1.33 \times 10^{-9} \\ 1.33 \times 10^{-9} \\ 3.1 \times 10^{-8} \\ 1.82 \times 10^{-8} \\ 1.06 \times 10^{-8} \\ 6.22 \times 10^{-9} \\ 8.13 \times 10^{-9} \\ 0.01 \end{pmatrix} \quad \sum D_{b10} = 0.01$$

5.4 Vermoeingstoetsen

Totale vermoeiingsschade betonstaal

$$D_s := \sum D_{s1} + \sum D_{s2} + \sum D_{s3} + \sum D_{s4} + \sum D_{s5} + \sum D_{s6} + \sum D_{s7} + \sum D_{s8} + \sum D_{s9} + \sum D_{s10}$$

$$\text{uc}_7 := D_s = 0.70$$

Totale vermoeiingsschade beton onder druk

$$D_b := \sum D_{b1} + \sum D_{b2} + \sum D_{b3} + \sum D_{b4} + \sum D_{b5} + \sum D_{b6} + \sum D_{b7} + \sum D_{b8} + \sum D_{b9} + \sum D_{b10}$$

$$\text{uc}_8 := D_b = 0.079$$

6. Detailleringregels

6.1 Tussenafstanden

NEN-EN 1992-1-1, art. 8.2 (2)

maximale staafdiameter $\varnothing_{\max} := \max(\varnothing_b, \varnothing_o, \varnothing_{\text{dwars}})$ $\varnothing_{\max} = 12\text{-mm}$

factor k_1 $k_1 := 1$

waarde k_2 $k_2 := 5\text{mm}$

vereiste verticale tussenafstand $s_{\min.v} := \max(k_1 \cdot \varnothing_{\max}, d_g + k_2, 20\text{mm})$

$$s_{\min.v} = 21\text{-mm}$$

aanwezige verticale tussenafstand $s_{\text{vert}} := h - c_b - \varnothing_b - c_o - \varnothing_o - 2 \cdot \varnothing_{\text{dwars}} = 30\text{-mm}$

controle verticale tussenafstand $\text{controle3} := \begin{cases} \text{"voldoet"} & \text{if } s_{\text{vert}} \geq s_{\min.v} \\ \text{"voldoet niet"} & \text{otherwise} \end{cases}$

controle3 = "voldoet"

vereiste horizontale tussenafstand $s_{\min.b} := \max(k_1 \cdot \varnothing_b, d_g + k_2, 20\text{mm})$

$$s_{\min.b} = 21\text{-mm}$$

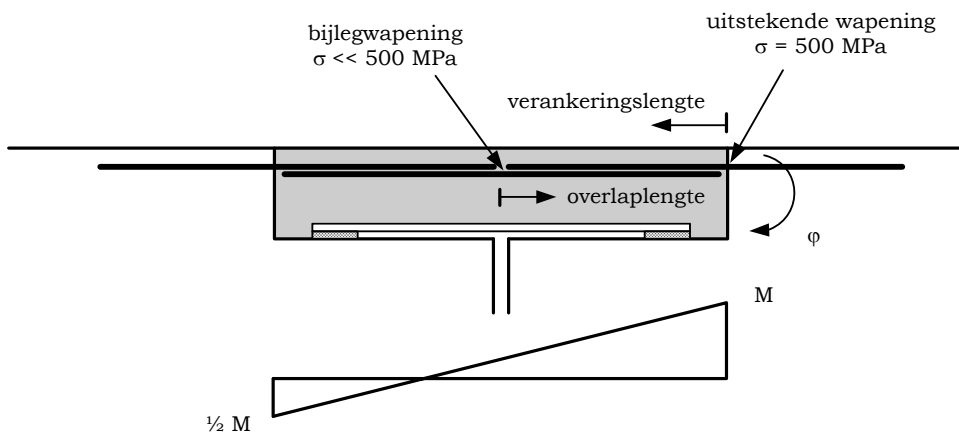
aanwezige horizontale tussenafstand $s_{\text{hor}} := s_b - 2 \cdot \varnothing_b = 51\text{-mm}$

controle staafafstand boven $\text{controle4} := \begin{cases} \text{"voldoet"} & \text{if } s_{\text{hor}} \geq s_{\min.b} \\ \text{"voldoet niet"} & \text{otherwise} \end{cases}$

controle4 = "voldoet"

6.2 Verankeringslengte

De minimaal benodigde verankeringslengte (= overlappende) in de voeg is met NEN-EN 1992-1-1, 8.4.2 t/m 8.4.4 bepaald. Daarbij hoeft de toeslag voor overlapping conform 8.7.3 niet in rekening te worden gebracht. Dit is in de figuur geïllustreerd voor kokerliggers, waarbij voegwapening wordt bijgelegd. De overlappende lengte geldt alleen voor de resterende spanning in de bijlegwapening in het midden van de voeg en deze spanning is veel kleiner dan de spanning ter plaatse van de inklemming.



rekenwaarde treksterkte

$$\alpha_{ct} := 1.0$$

$$f_{ctk.0.05} := 0.7 \cdot f_{ctm}$$

$$f_{ctk.0.05} = 2.25 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{ctd} := \frac{\alpha_{ct} \cdot f_{ctk.0.05}}{\gamma_C}$$

$$f_{ctd} = 1.50 \cdot \text{MPa}$$

opneembare aanhechtspanning

$$\eta_1 := 1.0 \quad (\text{goede aanhechtingsomstandigheden})$$

$$\eta_2 := 1.0 \quad (\text{staafdiameter} < 32 \text{ mm})$$

$$f_{bd} := 2.25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctd}$$

$$f_{bd} = 3.37 \cdot \text{MPa}$$

basisverankeringslengte

$$l_{b.rqd} := \frac{\varnothing_b}{4} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{bd}}$$

$$l_{b.rqd} = 387 \cdot \text{mm}$$

bepaling factoren α_1 t/m α_5

$$\alpha_1 := 1.0$$

$$\alpha_3 := 1.0$$

$$\alpha_4 := 1.0$$

$$\alpha_5 := 1.0$$

$$c_d := \min\left(\frac{s_{hor}}{2}, c_b\right)$$

$$c_d = 25.5 \cdot \text{mm}$$

$$\alpha_2 := \begin{cases} \left(1 - 0.15 \cdot \frac{c_d - \varnothing_b}{\varnothing_b}\right) & \text{if } c_d \leq 3 \cdot \varnothing_b \wedge c_d \geq \varnothing_b \\ 0.7 & \text{if } c_d > 3 \cdot \varnothing_b \\ 1.0 & \text{if } c_d < \varnothing_b \end{cases}$$

$$\alpha_2 = 0.83$$

ondergrens verankeringslengte

$$l_{b.min} := \max(0.3 \cdot l_{b.rqd}, 10 \cdot \varnothing_b, 100 \text{ mm})$$

$$l_{b.min} = 120 \cdot \text{mm}$$

rekenwaarde verankeringslengte

$$l_{bd} := \max(\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_5 \cdot l_{b.rqd}, l_{b.min})$$

$$l_{bd} = 322 \cdot \text{mm}$$

toets bij kokerliggers

$$\text{controle5} := \begin{cases} \text{"voldoet"} & \text{if } 0.5 \cdot L_t \geq l_{bd} \\ \text{"voldoet niet"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{controle5} = \text{"voldoet"}$$

7. SAMENVATTING

Toets sterkte (UGT/STR)

Buiging en trek

momentcapaciteit	$M_{Ed} = 19.5 \cdot \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$	$M_{Rd} = 49.8 \cdot \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$	$uc_1 = 0.39$
------------------	---	---	---------------

betondrukzonehoogte	$x_u = 32.6 \cdot \text{mm}$	$x_{u\text{max}} = 54.6 \cdot \text{mm}$	$uc_2 = 0.60$
---------------------	------------------------------	--	---------------

Dwarskracht en trek

dwarskrachtcapaciteit	$V_{Ed\beta} = 70.4 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$	$V_{Rd.c} = 81.2 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$	$uc_3 = 0.87$
-----------------------	---	--	---------------

betondrukdiagonaal	$V_{Ed} = 110.8 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$	$V_{Rd.\text{max}} = 614.0 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$	$uc_4 = 0.18$
--------------------	---	--	---------------

Toets scheurvorming (BGT)

maximale staalspanning	$\sigma_{s\text{kar}} = 455 \cdot \text{MPa}$	$\sigma_{\text{max}} = 500 \cdot \text{MPa}$	$uc_5 = 0.91$
------------------------	---	--	---------------

scheurwijdte	$w_k = 0.43 \cdot \text{mm}$	$k_x \cdot w_{\text{max}} = 0.50 \cdot \text{mm}$	$uc_6 = 0.87$
--------------	------------------------------	---	---------------

Toets vermoeiing (UGT/STR)

betonstaal	schade volgens Miner	$D_s = 0.696$	$uc_7 = 0.70$
------------	----------------------	---------------	---------------

beton onder druk	schade volgens Miner	$D_b = 0.0786$	$uc_8 = 0.08$
------------------	----------------------	----------------	---------------

Controle betondekking

bovenzijde	$c_b = 62 \cdot \text{mm}$	$c_{\text{nom.b}} = 50 \cdot \text{mm}$
------------	----------------------------	---

$controle1 = \text{"voldoet"}$

onderzijde	$c_o = 30 \cdot \text{mm}$	$c_{\text{nom.o}} = 30 \cdot \text{mm}$
------------	----------------------------	---

$controle2 = \text{"voldoet"}$

Detaileringseisen

korreldiameter	$d_g = 16 \cdot \text{mm}$
----------------	----------------------------

verticale tussenafstand	$s_{\text{vert}} = 30 \cdot \text{mm}$	$s_{\text{min.v}} = 21 \cdot \text{mm}$
-------------------------	--	---

$controle3 = \text{"voldoet"}$

tussenafstand bovenstaven	$s_{\text{hor}} = 51 \cdot \text{mm}$	$s_{\text{min.b}} = 21 \cdot \text{mm}$
---------------------------	---------------------------------------	---

$controle4 = \text{"voldoet"}$

verankeringslengte (boven) voor kokerliggers	$0.5 \cdot L_t = 435 \cdot \text{mm}$	$l_{bd} = 322 \cdot \text{mm}$
---	---------------------------------------	--------------------------------

$controle5 = \text{"voldoet"}$

BEREKENING BUIGSLAPPE VOEGEN - Standaarddetail railbalken met druklaag

File: Buigslap-v08.xmcd

Mathcad 14.0

datum: december 2016

1. ALGEMENE GEGEVENS	2
1.1 Eenheden	
1.2 Afkortingen	
1.3 Beschouwde doorsnede	
2. UITGANGSPUNTEN	3
2.1 Geometrie	
2.2 Wapeningshoeveelheid en ligging	
2.3 Materialen	
2.3.1 Beton	
2.3.2 Betonstaal	
2.4 Belastinggevallen	
2.4.1 Verkeersbelasting op de voeg (BG1)	
2.4.2 Normaaltrekkracht door rembelasting (BG2)	
2.4.3 Opgelegde vervormingen (BG3)	
2.5 Gevolgklasse en belastingsfactoren	
2.6 Toelaatbare scheurwijdte	
2.7 Ontwerplevensduur	
3. TOETS STERKTE (UGT/STR)	9
3.1 Buiging en trek	
3.1.1 <i>Toets momentcapaciteit (negatieve buiging)</i>	
3.1.2 <i>Toets betondrukzonehoogte</i>	
3.2 Dwarskracht en trek	
3.2.1 <i>Bepaling rekenwaarde dwarskracht en trekkracht</i>	
3.2.2 <i>Bepaling dwarskrachtcapaciteit</i>	
3.2.3 <i>Toets dwarskracht</i>	
4. TOETS SCHEURWIJDTE (BGT)	12
4.1 Krommingen door opgelegde vervormingen	
4.2 Momenten door opgelegde krommingen	
4.2.1 <i>Verkeersbelasting configuratie 1 - karakteristiek</i>	
4.2.2 <i>Verkeersbelasting configuratie 1 - frequent</i>	
4.2.3 <i>Verkeersbelasting configuratie 2 - karakteristiek</i>	
4.2.4 <i>Verkeersbelasting configuratie 2 - frequent</i>	
4.2.5 <i>Samenvatting van momenten door opgelegde krommingen</i>	
4.3 Berekening staalspanning door belasting en opgelegde vervormingen	
4.3.1 <i>Verkeersbelasting configuratie 1 - karakteristieke combinatie</i>	
4.3.2 <i>Verkeersbelasting configuratie 1 - frequente combinatie</i>	
4.3.3 <i>Verkeersbelasting configuratie 2 - karakteristieke combinatie</i>	
4.3.4 <i>Verkeersbelasting configuratie 2 - frequente combinatie</i>	
4.3.5 <i>Samenvatting van staalspanningen door belasting en opgelegde vervormingen</i>	
4.4 Toets maximale staalspanning	
4.5 Scheurwijdte toets	
5. TOETS VERMOEIING (UGT/FAT)	19
5.1 Staal- en betonspanning als functie van kromming en moment	
5.2 Vermoeiingsbelasting FLM4b	
5.3 Vermoeiingsschade volgens Miner	
5.4 Vermoeiingstoetsen	
6. DETAILLERING	41
6.1 Staafafstanden	
6.2 Verankerings- en overlaplengte	
7. SAMENVATTING	43

1. ALGEMENE GEGEVENS

1.1 Eenheden

SI eenheden

m (meter)

N (Newton)

rad (radialen)

Afgeleide eenheden:

mm (millimeter)

kN (kilonewton)

kNm (kilonewtonmeter)

kNm := kN·m

MPa (megapascal = newton/millimeter²)

mrad (millirad)

mrad := rad·10⁻³

1.2 Afkortingen

UGT = uiterste grenstoestand

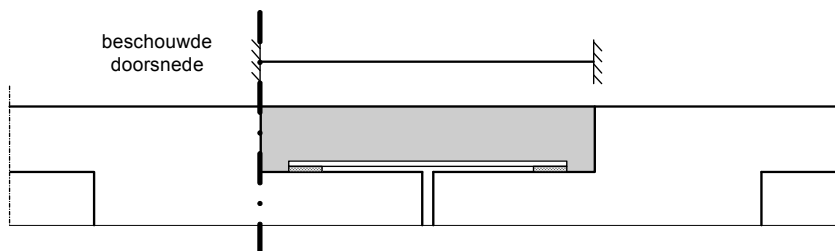
BGT = bruikbaarheidsgrenstoestand

STR = sterkte (strength)

FAT = vermoeiing (fatigue)

1.3 Beschouwde doorsnede

Deze rekensheet betreft een toetsing van de maatgevende steunpuntdoorsnede op negatieve buiging. Verondersteld is dat een onderwapening gelijk aan ten minste de helft van de bovenwapeningaanwezig is. Een toetsing op positieve buiging (steunpunt en veld) is in dat geval niet noodzakelijk.



2. UITGANGSPUNTEN

Invoerparameters zijn als volgt omkaderd en gearceerd:

invoerwaarde

Resultaten van toetsingen zijn als volgt omkaderd en gemarkeerd

resultaat

2.1 Geometrie

voeghoogte (zie figuur)

$h := 160\text{mm}$

voeglengte (zie figuur, gemeten loodrecht op as steunpunt)

$L := 800\text{mm}$

dagmaat (voor dwarskrachttoets)

$$L_{\text{dag}} := L - 2 \cdot 50\text{mm}$$

$L_{\text{dag}} = 700\text{mm}$

overspanning (NEN-EN 1992-1-1, fig. 5.4)

$$L_t := L_{\text{dag}} + h$$

$L_t = 860\text{mm}$

breedte van de buigslappe voeg (= brugbreedte)

$b := 9\text{m}$

totale ongedilateerde lengte van de brug

$L_{\text{brug}} := 150\text{m}$

aantal overspanningen

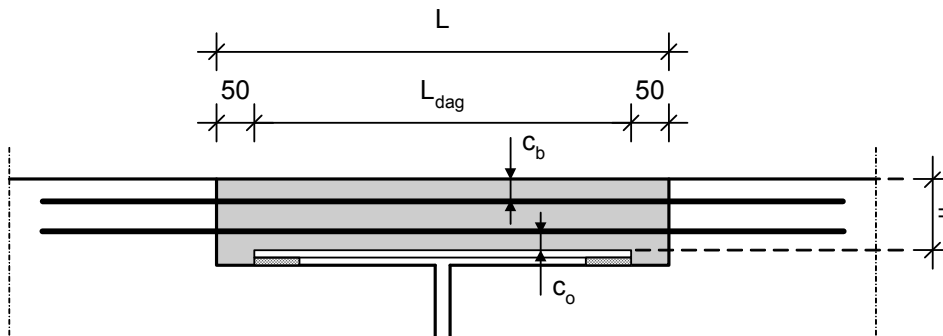
$n_0 := 6$

asfaltdikte bij buigslappe voeg

$d_{\text{asf}} := 0.12\text{m}$

kruisingshoek (recht = 90 graden)

$\alpha := 90\text{deg}$



2.2 Wapeningshoeveelheid en ligging

vereiste betondekking bovenzijde

$c_{\text{nom.b}} := 50\text{mm}$

vereiste betondekking onderzijde

$c_{\text{nom.o}} := 30\text{mm}$

bovenwapening:

staafdiameter

$\varnothing_b := 12\text{mm}$

staafafstand

$s_b := 75\text{mm}$

betondekking

$c_b := 53\text{mm}$

controle betondekking

$$\text{controle1} := \begin{cases} \text{"voldoet"} & \text{if } c_b \geq c_{\text{nom.b}} \\ \text{"voldoet niet"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

controle1 = "voldoet"

oppervlakte

$$A_{\text{sb}} := \frac{\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot \varnothing_b^2}{s_b}$$

$A_{\text{sb}} = 1508 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$

ligging t.o.v. onderzijde

$$d_b := h - c_b - \frac{1}{2} \cdot \varnothing_b$$

$d_b = 101\text{mm}$

onderwapening (50% van bovenwapening):

staafdiameter	$\varnothing_o := \varnothing_b$	$\varnothing_o = 12\text{-mm}$
staafafstand	$s_o := 2 \cdot s_b$	$s_o = 150\text{-mm}$
betondekking		$c_o := 30\text{mm}$

controle betondekking	controle2 :=	$\begin{cases} \text{"voldoet"} & \text{if } c_o \geq c_{\text{nom.o}} \\ \text{"voldoet niet"} & \text{otherwise} \end{cases}$
-----------------------	--------------	---

controle2 = "voldoet"

oppervlakte	$A_{s_o} := \frac{\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot \varnothing_o^2}{s_o}$	$A_{s_o} = 754 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$
-------------	--	--

ligging t.o.v. onderzijde	$d_o := c_o + \frac{1}{2} \cdot \varnothing_o$	$d_o = 36\text{-mm}$
---------------------------	--	----------------------

dwarswapening:

staafdiameter		$\varnothing_{\text{dwars}} := 12\text{mm}$
---------------	--	---

<u>totale hoeveelheid hoofdwapening</u>	$A_s := A_{s_b} + A_{s_o}$	$A_s = 2262 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$
---	----------------------------	---

2.3 Materialen

2.3.1 Beton

NEN-EN 1992-1-1, art. 3.1.6 en 3.1.7 en Tabel 3.1

karakteristieke cilinderdruksterkte (bijv. C35/45 => $f_{ck} = 35\text{ MPa}$)		$f_{ck} := 35\text{MPa}$
---	--	--------------------------

maximale korreldiameter (t.b.v. controle tussenafstanden)		$d_g := 16\text{mm}$
---	--	----------------------

materiaalfactor beton		$\gamma_C := 1.5$
-----------------------	--	-------------------

langeduur effect		$\alpha_{cc} := 1.0$
------------------	--	----------------------

rekenwaarde druksterkte	$f_{cd} := \frac{\alpha_{cc} \cdot f_{ck}}{\gamma_C}$	$f_{cd} = 23.3\text{-MPa}$
-------------------------	---	----------------------------

gemiddelde druksterkte	$f_{cm} := f_{ck} + 8\text{MPa}$	$f_{cm} = 43\text{-MPa}$
------------------------	----------------------------------	--------------------------

gemiddelde treksterkte	$f_{ctm} := 0.3 \cdot \left(\frac{f_{ck}}{\text{MPa}} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot \text{MPa}$	$f_{ctm} = 3.21\text{-MPa}$
------------------------	--	-----------------------------

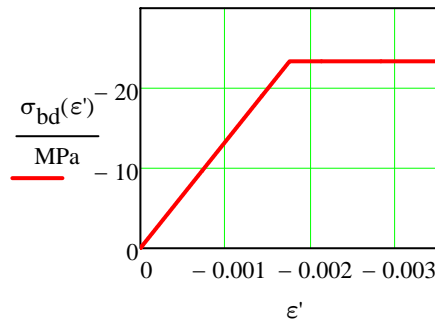
secans elasticiteitsmodulus	$E_{cm} := 22\text{GPa} \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10\text{MPa}} \right)^{0.3}$	$E_{cm} = 34.1\text{-GPa}$
-----------------------------	---	----------------------------

rek knikpunt bi-lineair diagram		$\epsilon_{c3} := -1.75 \cdot 10^{-3}$
---------------------------------	--	--

maximale rek (stuikrek) bi-lineair diagram		$\epsilon_{cu} := -3.5 \cdot 10^{-3}$
--	--	---------------------------------------

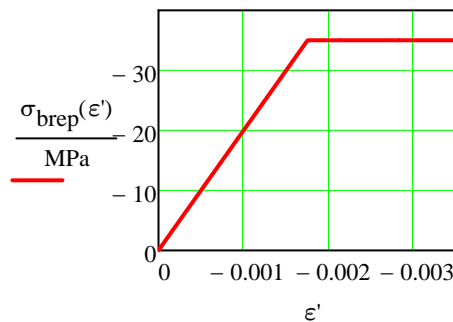
beschrijving σ - ε diagram UGT
(NEN-EN 1992-1-1, figuur 3.4)

$$\sigma_{bd}(\varepsilon) := \begin{cases} -f_{cd} \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c3}} & \text{if } \varepsilon \leq 0 \wedge \varepsilon > \varepsilon_{c3} \\ -f_{cd} & \text{if } \varepsilon \leq \varepsilon_{c3} \wedge \varepsilon > \varepsilon_{cu} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$



beschrijving σ - ε diagram BGT

$$\sigma_{brep}(\varepsilon) := \begin{cases} -f_{ck} \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c3}} & \text{if } \varepsilon \leq 0 \wedge \varepsilon > \varepsilon_{c3} \\ -f_{ck} & \text{if } \varepsilon \leq \varepsilon_{c3} \wedge \varepsilon > \varepsilon_{cu} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$



2.3.2 Betonstaal

NEN-EN 1992-1-1, art. 3.2.7

karakteristieke vloeigrens (B500B => $f_{yk} = 500$ MPa)

$$f_{yk} := 500 \text{ MPa}$$

materiaalfactor betonstaal

$$\gamma_S := 1.15$$

rekenwaarde vloeigrens

$$f_{yd} := \frac{f_{yk}}{\gamma_S}$$

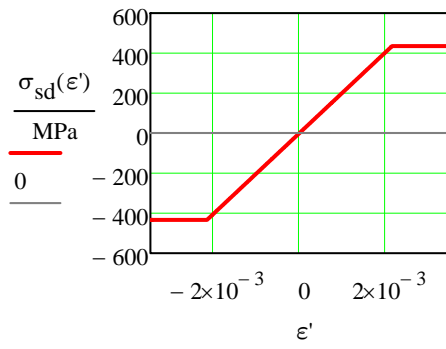
$$f_{yd} = 435 \text{ MPa}$$

elasticiteitsmodulus

$$E_s := 2 \cdot 10^5 \text{ MPa}$$

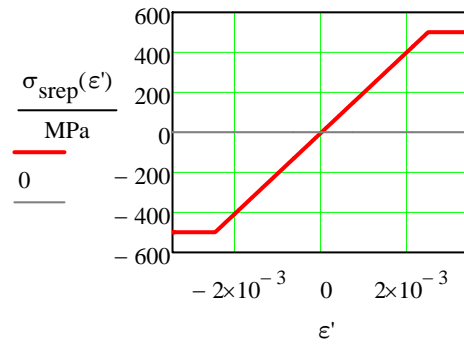
beschrijving σ - ε diagram UGT

$$\sigma_{sd}(\varepsilon) := \begin{cases} -f_{yd} & \text{if } \varepsilon < \frac{-f_{yd}}{E_s} \\ \varepsilon \cdot E_s & \text{if } \varepsilon \geq \frac{-f_{yd}}{E_s} \wedge \varepsilon \leq \frac{f_{yd}}{E_s} \\ f_{yd} & \text{if } \varepsilon > \frac{f_{yd}}{E_s} \end{cases}$$



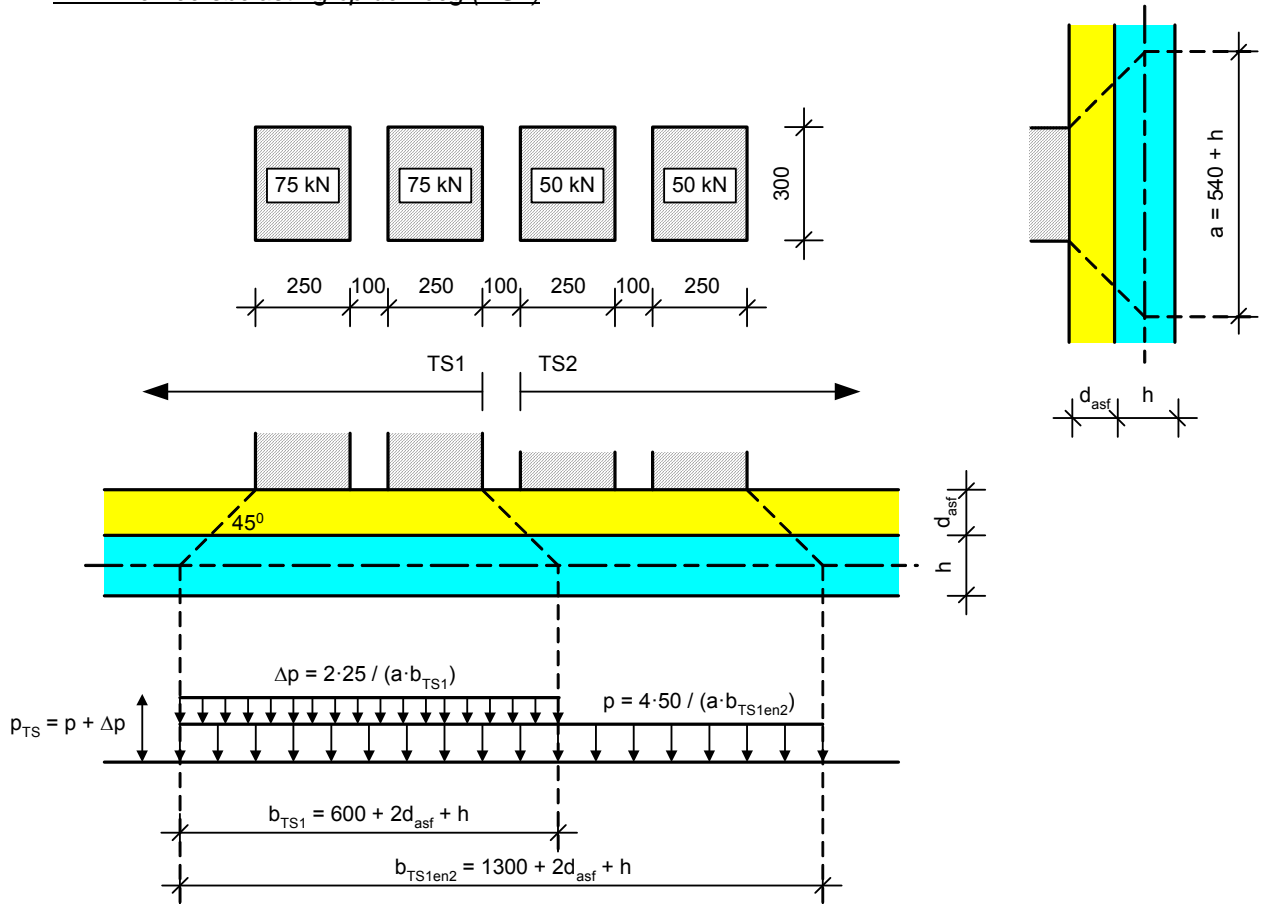
beschrijving σ - ϵ diagram BGT

$$\sigma_{srep}(\epsilon) := \begin{cases} -f_{yk} & \text{if } \epsilon < \frac{-f_{yk}}{E_s} \\ \epsilon \cdot E_s & \text{if } \epsilon \geq \frac{-f_{yk}}{E_s} \wedge \epsilon \leq \frac{f_{yk}}{E_s} \\ f_{yk} & \text{if } \epsilon > \frac{f_{yk}}{E_s} \end{cases}$$



2.4 Belastingsgevallen

2.4.1 Verkeersbelasting op de voeg (BG1)



spreiding in langsrichting

$$a := 0.3\text{m} + 2 \cdot d_{\text{asf}} + h$$

$$a = 0.70\text{ m}$$

spreiding dwarsrichting TS1

$$b_{\text{TS1}} := 0.6\text{m} + 2 \cdot d_{\text{asf}} + h$$

$$b_{\text{TS1}} = 1.00\text{ m}$$

spreiding dwarsrichting TS1+TS2

$$b_{\text{TS1en2}} := 1.3\text{m} + 2 \cdot d_{\text{asf}} + h$$

$$b_{\text{TS1en2}} = 1.70\text{ m}$$

gelijkmatig verdeelde belasting

$$p_{\text{TS}} := \frac{4 \cdot 50\text{kN}}{a \cdot b_{\text{TS1en2}}} + \frac{2 \cdot 25\text{kN}}{a \cdot b_{\text{TS1}}}$$

$$p_{\text{TS}} = 239 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

2.4.2 Normaaltrekkracht door rembelasting (BG2)

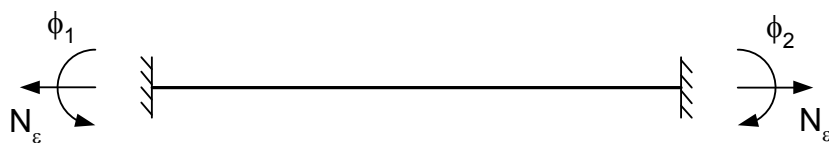
bovengrens voor normaaltrekkracht

$$N_{\text{rem}} := \frac{360\text{kN}}{4\text{m}} + \frac{3.11 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot \frac{1}{4} \cdot L_{\text{brug}}}{b}$$

$$N_{\text{rem}} = 103 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

2.4.3 Opgelegde vervormingen (BG3)

LET OP: tekenafspraken volgens figuur



hoekverdraaiingen door kruip (BG3a)

$$\phi_{1a} := 0 \text{ mrad}$$

$$\phi_{2a} := 0 \text{ mrad}$$

hoekverdraaiingen door rustende belasting (BG3b)

$$\phi_{1b} := 1.0 \text{ mrad}$$

$$\phi_{2b} := 1.0 \text{ mrad}$$

hoekverdraaiing door verkeer config 1 (BG3c)

$$\phi_{1c} := 3.3 \text{ mrad}$$

hoekverdraaiing door verkeer config 2 (BG3d)

$$\phi_{1d} := 5.9 \text{ mrad}$$

hoekverdraaiingen door temperatuurgradiënt (BG3e)

$$\phi_{1e} := 0.8 \text{ mrad}$$

$$\phi_{2e} := 0.8 \text{ mrad}$$

Voor de vermoeiingsberekening:

hoekverdraaiing door TS1 in het aangrenzende veld in het hart van de rijstrook voor zwaar verkeer

$$\phi_{TS1} := 1.9 \text{ mrad}$$

bijbehorende overspanning van het aangrenzend veld

$$L_{\text{veld}} := 15.6 \text{ m}$$

factor wielprenten scheve kruising (conform tabel)

$$\xi_1 := 1$$

factor opgelegde hoekverdraaiingen scheve kruising (conform tabel)

$$\xi_2 := 1$$

normaalkracht door verkorting (BG3f)

werkende breedte prefab ligger

$$b_w := 1.2 \text{ m}$$

max. horizontale reactie oplegblok

$$H_\epsilon := 40 \text{ kN}$$

maximale normaaltrekkracht

$$N_\epsilon := \frac{1}{2} \cdot n_0 \cdot H_\epsilon$$

$$N_\epsilon := \frac{1}{2} \cdot n_0 \cdot H_\epsilon$$

$$N_\epsilon = 100 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

2.5 Gevolgklasse en belastingsfactoren

gevolgklasse

$$CC := 2$$

belastingfactor verkeersbelasting

$$\gamma_Q := \begin{cases} 1.2 & \text{if } CC = 1 \\ 1.35 & \text{if } CC = 2 \\ 1.5 & \text{if } CC = 3 \end{cases}$$

$$\gamma_Q = 1.35$$

2.6 Toelaatbare scheurwijdte

NEN-EN 1992-1-1, Tabel 7.1N (milieuklasse X0)

maximale scheurwijdte

$$w_{\text{max}} := 0.4 \text{ mm}$$

2.7 Ontwerplevensduur

ontwerplevensduur (voor vermoeiingstoets)

$$t_{\text{ref}} := 50 \text{ jaar}$$

3. TOETS STERKTE (UGT/STR)

3.1 Buiging en trek

3.1.1 Toets momentcapaciteit (negatieve buiging)

NEN-EN 1992-1-1, art. 6.1

overspanning (in richting voegwapening) $L_{\alpha} := \frac{L_t}{\sin(\alpha)}$ $L_{\alpha} = 0.86 \text{ m}$

spreidingslengte wielprenten $a = 0.7 \text{ m}$

steunpuntsmoment representatief $a := \min(L_{\alpha}, a)$ $a = 0.7 \text{ m}$

$$M_{\text{rep}} := \frac{1}{12} \cdot p_{\text{TS}} \cdot a^2 \cdot \frac{(6 \cdot L_{\alpha}^2 - 8 \cdot a \cdot L_{\alpha} + 3 \cdot a^2)}{L_{\alpha}^2} = 14.4 \cdot \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$$

rekenwaarde steunpuntsmoment $M_{\text{Ed}} := \gamma_Q \cdot M_{\text{rep}}$ $M_{\text{Ed}} = 19.5 \cdot \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$

rekenwaarde normaaltrekkkracht $N_{\text{Ed}} := \gamma_Q \cdot N_{\text{rem}}$ $N_{\text{Ed}} = 139 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

rek onderzijde ($z = 0 \text{ mm}$) $\varepsilon_0 := \varepsilon_{\text{cu}}$

reklijn als functie van z en x $\varepsilon(z, x) := \varepsilon_0 - \frac{\varepsilon_0}{x} \cdot z$

bepaling drukzonehoogte uit normaalkrachtenevenwicht

resulterende drukkracht beton $N'_{\text{b}}(x) := \int_0^h \sigma_{\text{bd}}(\varepsilon(z, x)) dz$

kracht in bovenwapening $N_{\text{sb}}(x) := A_{\text{sb}} \cdot \sigma_{\text{sd}}(\varepsilon(d_{\text{b}}, x))$

kracht in onderwapening $N_{\text{so}}(x) := A_{\text{so}} \cdot \sigma_{\text{sd}}(\varepsilon(d_{\text{o}}, x))$

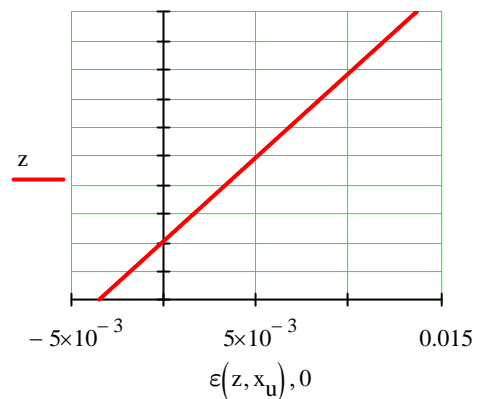
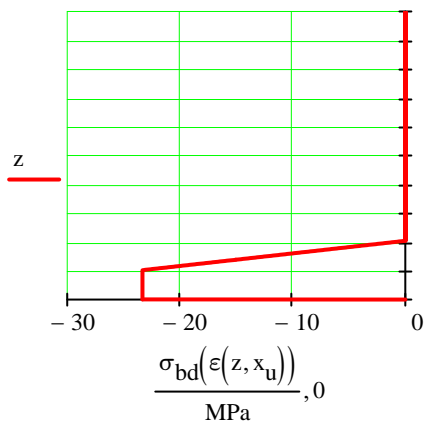
schatwaarde drukzonehoogte $x := 0.5 \cdot h$

Given

$$N'_{\text{b}}(x) + N_{\text{sb}}(x) + N_{\text{so}}(x) - N_{\text{Ed}} = 0$$

$$x_{\text{u}} := \text{Find}(x) \quad x_{\text{u}} = 33 \cdot \text{mm}$$

$$z := 0 \text{ mm}, 0.11 \text{ mm} \dots h$$



drukkracht beton $N'_b(x_u) = -571 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$
 uitwendige normaaltrekkkracht $N_{Ed} = 139 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$
 normaalkracht in bovenwapening $N_{sb}(x_u) = 656 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$ $\sigma_{sb} := \frac{N_{sb}(x_u)}{A_{sb}} = 435 \cdot \text{MPa}$
 normaalkracht in onderwapening $N_{so}(x_u) = 54 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$ $\sigma_{so} := \frac{N_{so}(x_u)}{A_{so}} = 72 \cdot \text{MPa}$
 momentcapaciteit
 $M_{Rd} := \int_0^h \sigma_{bd}(\varepsilon(z, x_u)) \cdot z \, dz + d_o \cdot N_{so}(x_u) + d_b \cdot N_{sb}(x_u) - N_{Ed} \cdot 0.5 \cdot h$ $M_{Rd} = 49.8 \cdot \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$

toets momentcapaciteit $uc_1 := \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}}$ $uc_1 = 0.39$

3.1.2 Toets betondrukzonehoogte NEN-EN 1992-1-1/NB, art. 6.1

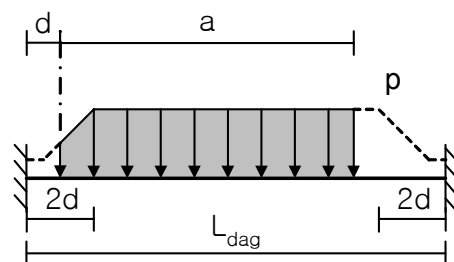
maximale betondrukzonehoogte $x_{umax} := \frac{-\varepsilon_{cu} \cdot 10^6}{-\varepsilon_{cu} \cdot 10^6 + 7 \cdot \frac{f_{yd}}{\text{MPa}}} \cdot d_b$ $x_{umax} = 54 \cdot \text{mm}$

toets betondrukzonehoogte $uc_2 := \frac{x_u}{x_{umax}}$ $uc_2 = 0.60$

3.2 Dwarskracht en trek

3.2.1 Bepaling rekenwaarde dwarskracht en trekkkracht NEN-EN 1992-1-1, art. 6.2

Dwarskracht wordt getoetst op afstand d inclusief reductie β (zie 6.2.1 (8) en 6.2.2 (6)).



dagmaat in richting van de voegwapening:

$L_{d\alpha} := \frac{L_{dag}}{\sin(\alpha)}$ $L_{d\alpha} = 0.70 \text{ m}$

dwarskracht in dag oplegging (zonder reductie met β)

$M_{links} := \frac{1}{12} \cdot p_{TS} \cdot a^2 \cdot \frac{(6 \cdot L_{d\alpha}^2 - 8 \cdot a \cdot L_{d\alpha} + 3 \cdot a^2)}{L_{d\alpha}^2} = 9.8 \cdot \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$

$M_{rechts} := \frac{1}{12} \cdot p_{TS} \cdot a^2 \cdot \frac{(4 \cdot L_{d\alpha} - 3 \cdot a) \cdot a}{L_{d\alpha}^2} = 9.8 \cdot \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$

$V_{rep.0} := \frac{p_{TS} \cdot a \cdot (2 \cdot L_{d\alpha} - a)}{2 \cdot L_{d\alpha}} + \frac{M_{links}}{L_{d\alpha}} - \frac{M_{rechts}}{L_{d\alpha}}$

$V_{rep.0} = 83.8 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

dwarskracht op afstand d (inclusief reductie met β)

$$V_{\text{rep}\beta} := V_{\text{rep}.0} - 1.25 \cdot p_{\text{TS}} \cdot d_b \quad V_{\text{rep}\beta} = 53.6 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

normaaltrekkkracht representatief

$$N_{\text{rem}} = 103 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

combinatie γ_Q ($Q_{\text{vert}} + 0,8 Q_{\text{rem}}$)

$$N_{\text{Ed}} := -\gamma_Q \cdot 0,8 \cdot N_{\text{rem}} \quad N_{\text{Ed}} = -111 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\sigma_{\text{cp}} := \frac{N_{\text{Ed}}}{h} \quad \sigma_{\text{cp}} = -0,69 \cdot \text{MPa}$$

$$V_{\text{Ed}} := \gamma_Q \cdot V_{\text{rep}.0} \quad V_{\text{Ed}} = 113,2 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$V_{\text{Ed}\beta} := \gamma_Q \cdot V_{\text{rep}\beta} \quad V_{\text{Ed}\beta} = 72,3 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

3.2.2 Bepaling dwarskrachtcapaciteit NEN-EN 1992-2, art. 6.2.2 (1)

wapeningsfractie

$$\rho_1 := \min\left(\frac{A_{\text{sb}}}{d_b}, 0,02\right) \quad \rho_1 = 0,015$$

dwarskrachtcapaciteit

$$k := \min\left(1 + \sqrt{\frac{200\text{mm}}{d_b}}, 2\right) \quad k = 2$$

$$C_{\text{Rd.c}} := 0,12 \quad k_1 := 0,15$$

$$V_{\text{Rd.c1}} := \left[C_{\text{Rd.c}} \cdot k \cdot \left(100 \cdot \rho_1 \cdot f_{\text{ck}} \cdot \text{MPa}^2\right)^{\frac{1}{3}} + k_1 \cdot \sigma_{\text{cp}} \right] \cdot d_b$$

$$V_{\text{Rd.c1}} = 80,1 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$v_{\text{min}} := 0,035 \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{f_{\text{ck}}}{\text{MPa}}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \text{MPa} \quad v_{\text{min}} = 0,59 \cdot \text{MPa}$$

$$V_{\text{Rd.c2}} := (v_{\text{min}} + k_1 \cdot \sigma_{\text{cp}}) \cdot d_b \quad V_{\text{Rd.c2}} = 48,6 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$V_{\text{Rd.c}} := \max(V_{\text{Rd.c1}}, V_{\text{Rd.c2}}) \quad V_{\text{Rd.c}} = 80,1 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

capaciteit betondrukdiagonaal
NEN-EN 1992-1-1, formule (6.5)

$$V_{\text{Rd.max}} := 0,5 \cdot d_b \cdot 0,6 \cdot \left(1 - \frac{f_{\text{ck}}}{250\text{MPa}}\right) \cdot f_{\text{cd}}$$

$$V_{\text{Rd.max}} = 608 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

3.2.3 Toets dwarskracht

toets dwarskracht op afstand d incl. β

$$uc_3 := \frac{V_{\text{Ed}\beta}}{V_{\text{Rd.c}}} \quad uc_3 = 0,90$$

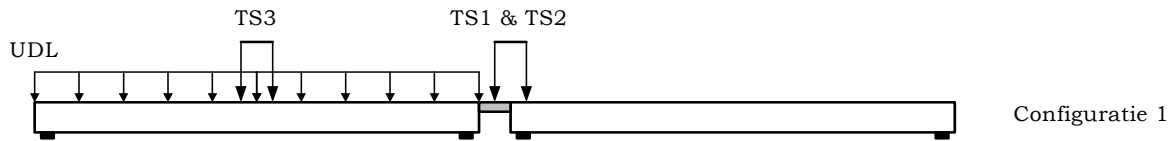
toets bezwijken betondrukdiagonaal

$$uc_4 := \frac{V_{\text{Ed}}}{V_{\text{Rd.max}}} \quad uc_4 = 0,19$$

4. TOETS SCHEURWIJDTE (BGT)

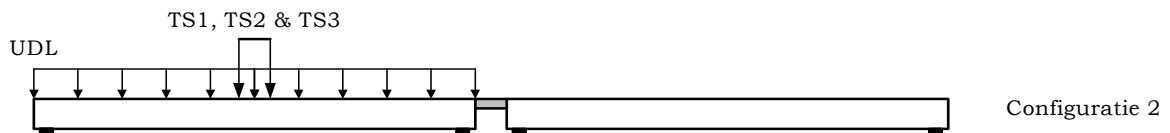
4.1 Krommingen door opgelegde vervormingen

verkeersbelasting configuratie 1 (TS1 en TS2 op de voeg, overige verkeersbelasting in het veld)



hoekverdraaiing belaste veld	karakteristiek	$\phi_{1kar} := \phi_{1a} + \phi_{1b} + \phi_{1c} + 0.3 \cdot \phi_{1e} = 4.5 \cdot \text{mrad}$
	frequent	$\phi_{1freq} := \phi_{1a} + \phi_{1b} + 0.8 \cdot \phi_{1c} + 0.3 \cdot \phi_{1e} = 3.9 \cdot \text{mrad}$
hoekverdraaiing onbelaste veld	karakteristiek	$\phi_{2kar} := \phi_{2a} + \phi_{2b} + 0.3 \cdot \phi_{2e} = 1.2 \cdot \text{mrad}$
	frequent	$\phi_{2freq} := \phi_{2a} + \phi_{2b} + 0.3 \cdot \phi_{2e} = 1.2 \cdot \text{mrad}$
maximale kromming steunpunt	karakteristiek	$\kappa_{1kar} := \frac{4 \cdot \phi_{1kar} - 2 \cdot \phi_{2kar}}{L_t}$
		$\kappa_{1kar} = 0.018 \frac{1}{\text{m}}$
	frequent	$\kappa_{1freq} := \frac{4 \cdot \phi_{1freq} - 2 \cdot \phi_{2freq}}{L_t}$
		$\kappa_{1freq} = 0.015 \frac{1}{\text{m}}$

verkeersbelasting configuratie 2 (alle verkeersbelasting in het veld)



hoekverdraaiing belaste veld	karakteristiek	$\phi_{1kar} := \phi_{1a} + \phi_{1b} + \phi_{1d} + 0.3 \cdot \phi_{1e} = 7.1 \cdot \text{mrad}$
	frequent	$\phi_{1freq} := \phi_{1a} + \phi_{1b} + 0.8 \cdot \phi_{1d} + 0.3 \cdot \phi_{1e} = 6.0 \cdot \text{mrad}$
hoekverdraaiing onbelaste veld	karakteristiek	$\phi_{2kar} := \phi_{2a} + \phi_{2b} + 0.3 \cdot \phi_{2e} = 1.2 \cdot \text{mrad}$
	frequent	$\phi_{2freq} := \phi_{2a} + \phi_{2b} + 0.3 \cdot \phi_{2e} = 1.2 \cdot \text{mrad}$
maximale kromming steunpunt	karakteristiek	$\kappa_{2kar} := \frac{4 \cdot \phi_{1kar} - 2 \cdot \phi_{2kar}}{L_t}$
		$\kappa_{2kar} = 0.03 \frac{1}{\text{m}}$
	frequent	$\kappa_{2freq} := \frac{4 \cdot \phi_{1freq} - 2 \cdot \phi_{2freq}}{L_t}$
		$\kappa_{2freq} = 0.025 \frac{1}{\text{m}}$

4.2 Momenten door opgelegde krommingen

4.2.1 Verkeersbelasting configuratie 1 - karakteristiek

reklijn als functie van z en x

$$\varepsilon(z, x) := -\kappa_{1kar} \cdot x + \kappa_{1kar} \cdot z$$

bepaling drukzonehoogte uit normaalkrachtenevenwicht

resulterende drukkracht beton

$$N'_b(x) := \int_0^h \sigma_{brep}(\varepsilon(z, x)) dz$$

kracht in bovenwapening

$$N_{sb}(x) := A_{sb} \cdot \sigma_{srep}(\varepsilon(d_b, x))$$

kracht in onderwapening

$$N_{so}(x) := A_{so} \cdot \sigma_{srep}(\varepsilon(d_o, x))$$

schatwaarde drukzonehoogte

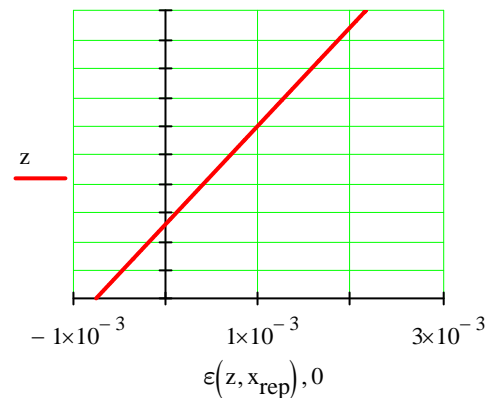
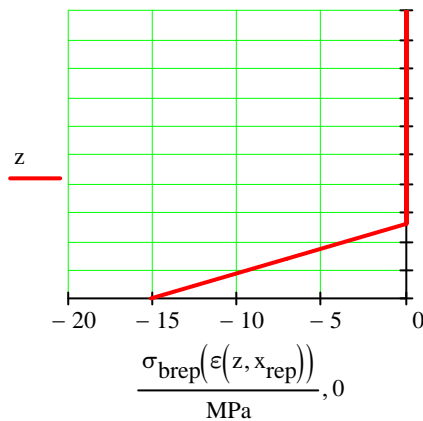
$$x := 0.5 \cdot h$$

Given

$$N'_b(x) + N_{sb}(x) + N_{so}(x) = 0$$

$$x_{rep} := \text{Find}(x) \quad x_{rep} = 41.4 \cdot \text{mm}$$

$$z := 0 \text{mm}, 0.1 \text{mm} \dots h$$



drukkracht beton

$$N'_b(x_{rep}) = -313 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

maximale drukspanning beton

$$\sigma_{brep}(\varepsilon(0, x_{rep})) = -15.1 \cdot \text{MPa}$$

normaalkracht in bovenwapening

$$N_{sb}(x_{rep}) = 328 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\sigma_{sb} := \frac{N_{sb}(x_{rep})}{A_{sb}} = 217 \cdot \text{MPa}$$

normaalkracht in onderwapening

$$N_{so}(x_{rep}) = -15 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\sigma_{so} := \frac{N_{so}(x_{rep})}{A_{so}} = -20 \cdot \text{MPa}$$

representatief moment

$$M_{1kar} := \int_0^h \sigma_{brep}(\varepsilon(z, x_{rep})) \cdot z dz + d_o \cdot N_{so}(x_{rep}) + d_b \cdot N_{sb}(x_{rep})$$

$$M_{1kar} = 28.2 \cdot \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$$

4.2.2 Verkeersbelasting configuratie 1 - frequent

reklijn als functie van z en x

$$\varepsilon(z, x) := -\kappa_{1\text{freq}} \cdot x + \kappa_{1\text{freq}} \cdot z$$

Given

$$\int_0^h \sigma_{\text{brep}}(\varepsilon(z, x)) dz + A_{\text{sb}} \cdot \sigma_{\text{srep}}(\varepsilon(d_{\text{b}}, x)) + A_{\text{so}} \cdot \sigma_{\text{srep}}(\varepsilon(d_{\text{o}}, x)) = 0$$

$$x_{\text{rep}} := \text{Find}(x) \quad x_{\text{rep}} = 41.4 \cdot \text{mm}$$

$$M_{1\text{freq}} := \int_0^h \sigma_{\text{brep}}(\varepsilon(z, x_{\text{rep}})) \cdot z dz + d_{\text{o}} \cdot (A_{\text{so}} \cdot \sigma_{\text{srep}}(\varepsilon(d_{\text{o}}, x_{\text{rep}}))) + d_{\text{b}} \cdot (A_{\text{sb}} \cdot \sigma_{\text{srep}}(\varepsilon(d_{\text{b}}, x_{\text{rep}})))$$

4.2.3 Verkeersbelasting configuratie 2 - karakteristiek

reklijn als functie van z en x

$$\varepsilon(z, x) := -\kappa_{2\text{kar}} \cdot x + \kappa_{2\text{kar}} \cdot z$$

Given

$$\int_0^h \sigma_{\text{brep}}(\varepsilon(z, x)) dz + A_{\text{sb}} \cdot \sigma_{\text{srep}}(\varepsilon(d_{\text{b}}, x)) + A_{\text{so}} \cdot \sigma_{\text{srep}}(\varepsilon(d_{\text{o}}, x)) = 0$$

$$x_{\text{rep}} := \text{Find}(x) \quad x_{\text{rep}} = 41.4 \cdot \text{mm}$$

$$M_{2\text{kar}} := \int_0^h \sigma_{\text{brep}}(\varepsilon(z, x_{\text{rep}})) \cdot z dz + d_{\text{o}} \cdot (A_{\text{so}} \cdot \sigma_{\text{srep}}(\varepsilon(d_{\text{o}}, x_{\text{rep}}))) + d_{\text{b}} \cdot (A_{\text{sb}} \cdot \sigma_{\text{srep}}(\varepsilon(d_{\text{b}}, x_{\text{rep}})))$$

4.2.4 Verkeersbelasting configuratie 2 - frequent

reklijn als functie van z en x

$$\varepsilon(z, x) := -\kappa_{2\text{freq}} \cdot x + \kappa_{2\text{freq}} \cdot z$$

Given

$$\int_0^h \sigma_{\text{brep}}(\varepsilon(z, x)) dz + A_{\text{sb}} \cdot \sigma_{\text{srep}}(\varepsilon(d_{\text{b}}, x)) + A_{\text{so}} \cdot \sigma_{\text{srep}}(\varepsilon(d_{\text{o}}, x)) = 0$$

$$x_{\text{rep}} := \text{Find}(x) \quad x_{\text{rep}} = 41.4 \cdot \text{mm}$$

$$M_{2\text{freq}} := \int_0^h \sigma_{\text{brep}}(\varepsilon(z, x_{\text{rep}})) \cdot z dz + d_{\text{o}} \cdot (A_{\text{so}} \cdot \sigma_{\text{srep}}(\varepsilon(d_{\text{o}}, x_{\text{rep}}))) + d_{\text{b}} \cdot (A_{\text{sb}} \cdot \sigma_{\text{srep}}(\varepsilon(d_{\text{b}}, x_{\text{rep}})))$$

4.2.5 Samenvatting van momenten door opgelegde krommingen

verkeersbelasting configuratie 1	karakteristiek	$\kappa_{1\text{kar}} = 0.018 \frac{1}{\text{m}}$	$M_{1\text{kar}} = 28.2 \cdot \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$
	frequent	$\kappa_{1\text{freq}} = 0.015 \frac{1}{\text{m}}$	$M_{1\text{freq}} = 23.5 \cdot \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$
verkeersbelasting configuratie 2	karakteristiek	$\kappa_{2\text{kar}} = 0.03 \frac{1}{\text{m}}$	$M_{2\text{kar}} = 47 \cdot \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$
	frequent	$\kappa_{2\text{freq}} = 0.025 \frac{1}{\text{m}}$	$M_{2\text{freq}} = 38.5 \cdot \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$

4.3 Berekening staalspanning door belastingen en opgelegde vervormingen

4.3.1 Verkeersbelasting configuratie 1 - karakteristieke combinatie

moment door wielprenten op voeg	$\frac{1}{12} \cdot p_{TS} \cdot L^2 = 12.8 \cdot \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$
moment door kromming + verkeer	$M_{1kar} := M_{1kar} + \frac{1}{12} \cdot p_{TS} \cdot L^2 = 41.0 \cdot \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$
normaalkracht door verkorting + rembelasting	$N_{1kar} := N_{\epsilon} + 0.8 \cdot N_{rem} = 182.4 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$
bepaling drukzonehoogte uit momenten- en normaalkrachtevenwicht	
reklijn als functie van z en onbekenden x en ϵ_0	$\epsilon(z, x, \epsilon_0) := \epsilon_0 - \frac{\epsilon_0}{x} \cdot z$
resulterende drukkracht beton	$N'_b(x, \epsilon_0) := \int_0^h \sigma_{brep}(\epsilon(z, x, \epsilon_0)) dz$
kracht in bovenwapening	$N_{sb}(x, \epsilon_0) := A_{sb} \cdot E_s \cdot \epsilon(d_b, x, \epsilon_0)$
kracht in onderwapening	$N_{so}(x, \epsilon_0) := A_{so} \cdot E_s \cdot \epsilon(d_o, x, \epsilon_0)$
schatwaarde drukzonehoogte	$x := 0.5 \cdot h$
schatwaarde rek onderzijde	$\epsilon_0 := \epsilon_{c3} = -1.75 \times 10^{-3}$

Given

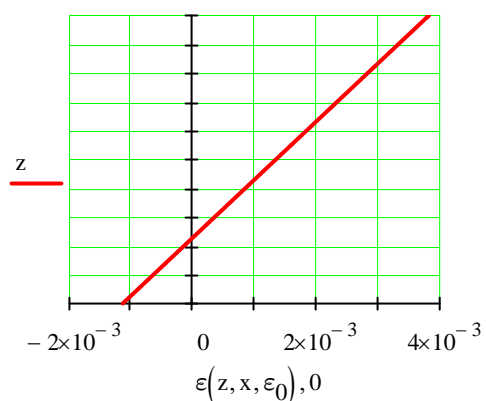
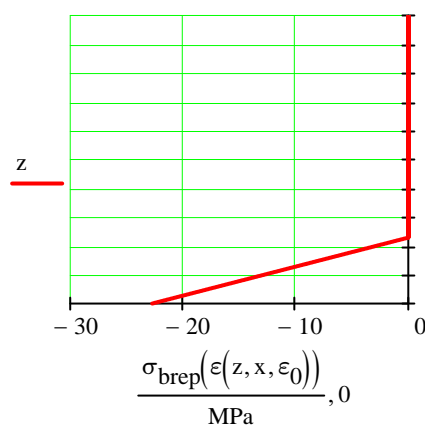
$$N'_b(x, \epsilon_0) + N_{sb}(x, \epsilon_0) + N_{so}(x, \epsilon_0) - N_{1kar} = 0$$

$$\int_0^h \sigma_{brep}(\epsilon(z, x, \epsilon_0)) \cdot z dz + d_o \cdot N_{so}(x, \epsilon_0) + d_b \cdot N_{sb}(x, \epsilon_0) - N_{1kar} \cdot 0.5 \cdot h - M_{1kar} = 0$$

$$\begin{pmatrix} x \\ \epsilon_0 \end{pmatrix} := \text{Find}(x, \epsilon_0)$$

$$x = 36.6 \cdot \text{mm}$$

$$\epsilon_0 = -1.14 \times 10^{-3}$$



kromming	$\frac{-\varepsilon_0}{x} = 0.031 \frac{1}{m}$	uit dek	$\kappa_{1kar} = 0.018 \frac{1}{m}$
drukkraft beton	$N'_b(x, \varepsilon_0) = -417 \cdot \frac{kN}{m}$		
uitwendige normaaltrekkraft	$N_{1kar} = 182 \cdot \frac{kN}{m}$		
normaalkracht in bovenwapening	$N_{sb}(x, \varepsilon_0) = 602 \cdot \frac{kN}{m}$	$\sigma_{s1kar} := \frac{N_{sb}(x, \varepsilon_0)}{A_{sb}} = \bullet \cdot MPa$	
normaalkracht in onderwapening	$N_{so}(x, \varepsilon_0) = -3 \cdot \frac{kN}{m}$	$\sigma_{so} := \frac{N_{so}(x, \varepsilon_0)}{A_{so}} = -4 \cdot MPa$	

4.3.2 Verkeersbelasting configuratie 1 - frequente combinatie

moment door kromming + verkeer $M_{1freq} := M_{1freq} + 0.8 \cdot \frac{1}{12} \cdot p_{TS} \cdot L^2 = 33.7 \cdot \frac{kNm}{m}$

normaalkracht door verkorting + rembelasting $N_{1freq} := N_{\varepsilon} + 0.8 \cdot 0.8 \cdot N_{rem} = 165.9 \cdot \frac{kN}{m}$

Given

$$N'_b(x, \varepsilon_0) + N_{sb}(x, \varepsilon_0) + N_{so}(x, \varepsilon_0) - N_{1freq} = 0$$

$$\int_0^h \sigma_{brep}(\varepsilon(z, x, \varepsilon_0)) \cdot z \, dz + d_o \cdot N_{so}(x, \varepsilon_0) + d_b \cdot N_{sb}(x, \varepsilon_0) - N_{1freq} \cdot 0.5 \cdot h - M_{1freq} = 0$$

$$\begin{pmatrix} x \\ \varepsilon_0 \end{pmatrix} := \text{Find}(x, \varepsilon_0) \quad x_{1freq} := x = 36.2 \cdot \text{mm} \quad \varepsilon_{1freq} := \varepsilon_0 = -9.37 \times 10^{-4}$$

staalspanning in bovenwapening $\sigma_{s1freq} := \frac{N_{sb}(x, \varepsilon_0)}{A_{sb}} = 335 \cdot MPa$

4.3.3 Verkeersbelasting configuratie 2 - karakteristieke combinatie

moment door kromming + verkeer $M_{2kar} = 47.0 \cdot \frac{kNm}{m}$

normaalkracht door verkorting + rembelasting $N_{2kar} := N_{\varepsilon} + 0.8 \cdot N_{rem} = 182.4 \cdot \frac{kN}{m}$

Given

$$N'_b(x, \varepsilon_0) + N_{sb}(x, \varepsilon_0) + N_{so}(x, \varepsilon_0) - N_{2kar} = 0$$

$$\int_0^h \sigma_{brep}(\varepsilon(z, x, \varepsilon_0)) \cdot z \, dz + d_o \cdot N_{so}(x, \varepsilon_0) + d_b \cdot N_{sb}(x, \varepsilon_0) - N_{2kar} \cdot 0.5 \cdot h - M_{2kar} = 0$$

$$\begin{pmatrix} x \\ \varepsilon_0 \end{pmatrix} := \text{Find}(x, \varepsilon_0) \quad x = 37.2 \cdot \text{mm} \quad \varepsilon_0 = -1.3 \times 10^{-3}$$

staalspanning in bovenwapening $\sigma_{s2kar} := \frac{N_{sb}(x, \varepsilon_0)}{A_{sb}} = 445 \cdot MPa$

4.3.4 Verkeersbelasting configuratie 2 - frequente combinatie

moment door kromming + verkeer $M_{2freq} = 38.5 \cdot \frac{kNm}{m}$

normaalkracht door verkorting + rembelasting $N_{2freq} := N_{\epsilon} + 0.8 \cdot 0.8 \cdot N_{rem} = 165.9 \cdot \frac{kN}{m}$

Given

$$N'_b(x, \epsilon_0) + N_{sb}(x, \epsilon_0) + N_{so}(x, \epsilon_0) - N_{2freq} = 0$$

$$\int_0^h \sigma_{brep}(\epsilon(z, x, \epsilon_0)) \cdot z \, dz + d_o \cdot N_{so}(x, \epsilon_0) + d_b \cdot N_{sb}(x, \epsilon_0) - N_{2freq} \cdot 0.5 \cdot h - M_{2freq} = 0$$

$$\begin{pmatrix} x \\ \epsilon_0 \end{pmatrix} := \text{Find}(x, \epsilon_0) \quad x_{2freq} := x = 36.8 \cdot \text{mm} \quad \epsilon_{2freq} := \epsilon_0 = -1.065 \times 10^{-3}$$

staalspanning in bovenwapening $\sigma_{s2freq} := \frac{N_{sb}(x, \epsilon_0)}{A_{sb}} = 372 \cdot \text{MPa}$

4.2.5 Samenvatting van staalspanningen door belastingen en opgelegde vervormingen

verkeer config 1	karakteristiek	$M_{1kar} = 41.0 \cdot \frac{kNm}{m}$	$N_{1kar} = 182 \cdot \frac{kN}{m}$	$\sigma_{s1kar} = 399 \cdot \text{MPa}$
	frequent	$M_{1freq} = 33.7 \cdot \frac{kNm}{m}$	$N_{1freq} = 166 \cdot \frac{kN}{m}$	$\sigma_{s1freq} = 335 \cdot \text{MPa}$
verkeer config 2	karakteristiek	$M_{2kar} = 47.0 \cdot \frac{kNm}{m}$	$N_{2kar} = 182 \cdot \frac{kN}{m}$	$\sigma_{s2kar} = 445 \cdot \text{MPa}$
	frequent	$M_{2freq} = 38.5 \cdot \frac{kNm}{m}$	$N_{2freq} = 166 \cdot \frac{kN}{m}$	$\sigma_{s2freq} = 372 \cdot \text{MPa}$

4.4 Toets maximale staalspanning NEN-EN 1992-1-1, art. 7.2 (5)

maatgevende staalspanning	$\sigma_{skar} := \max(\sigma_{s1kar}, \sigma_{s2kar})$	$\sigma_{skar} = 445 \cdot \text{MPa}$
toelaatbare staalspanning	$k_4 := 1.0 \quad \sigma_{max} := k_4 \cdot f_{yk}$	$\sigma_{max} = 500 \cdot \text{MPa}$
toets staalspanning	$uc_5 := \frac{\sigma_{skar}}{\sigma_{max}}$	$uc_5 = 0.89$

4.5 Scheurwijdte toets NEN-EN 1992-1-1, art. 7.3.4

maatgevende staalspanning	$\sigma_s := \max(\sigma_{s1freq}, \sigma_{s2freq})$	$\sigma_s = 372 \cdot \text{MPa}$
bijbehorende drukzonehoogte	$x_{rep} := \text{if}(\sigma_{s1freq} > \sigma_{s2freq}, x_{1freq}, x_{2freq})$	$x_{rep} = 36.8 \cdot \text{mm}$
bijbehorende rek onderzijde	$\epsilon_2 := \text{if}(\sigma_{s1freq} > \sigma_{s2freq}, \epsilon_{1freq}, \epsilon_{2freq})$	$\epsilon_2 = -1.07 \times 10^{-3}$
bijbehorende rek bovenzijde	$\epsilon_1 := \frac{h - x}{x} \cdot -\epsilon_2$	$\epsilon_1 = 3.57 \times 10^{-3}$
verhouding elasticiteitsmoduli	$\alpha_e := \frac{E_s}{E_{cm}}$	$\alpha_e = 5.87$

factor belastingsduur	kortdurend (hoofdzakelijk verkeer)	$k_t := 0.6$
effectieve treksterkte	$f_{ct,eff} := f_{ctm}$	$f_{ct,eff} = 3.21 \cdot \text{MPa}$
effectieve hoogte	$h_{c,ef} := \min \left[2.5 \cdot (h - d_b), \frac{h - x_{rep}}{3}, \frac{h}{2} \right]$	$h_{c,ef} = 41 \cdot \text{mm}$
vergroting effectieve hoogte volgens Duitse NB	$h_{c,ef} := \begin{cases} \frac{h - x_{rep}}{2} & \text{if } c_b + \frac{1}{2} \cdot \varnothing_b > h_{c,ef} \\ h_{c,ef} & \text{otherwise} \end{cases}$	$h_{c,ef} = 62 \cdot \text{mm}$
effectieve oppervlakte	$A_{c,eff} := h_{c,ef}$	$A_{c,eff} = 61612 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$
effectieve wapeningsfractie	$\rho_{p,eff} := \frac{A_{sb}}{A_{c,eff}}$	$\rho_{p,eff} = 0.024$
rekverschil tussen scheuren	$\Delta \varepsilon := \max \left[\frac{\sigma_s - k_t \cdot \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{p,eff})}{E_s}, 0.6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} \right]$ $\Delta \varepsilon = 0.00141$	
scheurafstand	$k_1 := 0.8$ $k_2 := \max \left(\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2 \cdot \varepsilon_1}, 0.5 \right)$ $k_3 := 3.4$ $k_4 := 0.425$ $s_{r,max} := \begin{cases} \left(k_3 \cdot c_b + k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \frac{\varnothing_b}{\rho_{p,eff}} \right) & \text{if } s_b < 5 \cdot \left(c_b + \frac{\varnothing_b}{2} \right) \\ 1.3 \cdot (h - x_{rep}) & \text{if } s_b > 5 \cdot \left(c_b + \frac{\varnothing_b}{2} \right) \end{cases}$ $s_{r,max} = 264 \cdot \text{mm}$	$k_2 = 0.5$
scheurwijdte	$w_k := \frac{s_{r,max}}{\sin(\alpha)} \cdot \Delta \varepsilon$	$w_k = 0.37 \cdot \text{mm}$
toelaatbare scheurwijdte	$k_x := \frac{c_b}{c_{nom,b}}$ $w_{max} = 0.40 \cdot \text{mm}$	$k_x = 1.06$
toets scheurwijdte	$uc_6 := \frac{w_k}{k_x \cdot w_{max}}$	$uc_6 = 0.88$

5. TOETS VERMOEIING (UGT/FAT)

5.1 Staal- en betonspanning als functie van moment en kromming

reklijn als functie van z en x $\epsilon(z, x) := \epsilon_{c3} - \frac{\epsilon_{c3}}{x} \cdot z$ $\epsilon_{c3} = -1.75 \times 10^{-3}$

resulterende drukkracht beton $N'_b(x) := \int_0^h \sigma_{brep}(\epsilon(z, x)) dz$

kracht in bovenwapening $N_{sb}(x) := A_{sb} \cdot E_s \cdot \epsilon(d_b, x)$

kracht in onderwapening $N_{so}(x) := A_{so} \cdot E_s \cdot \epsilon(d_o, x)$

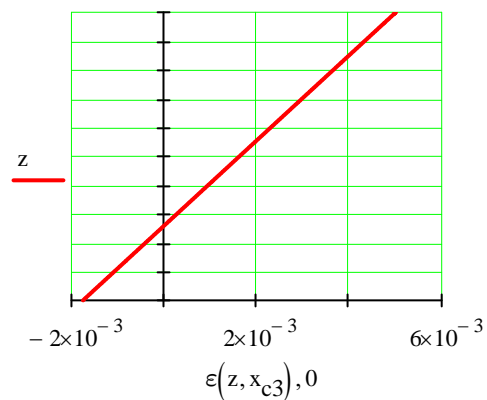
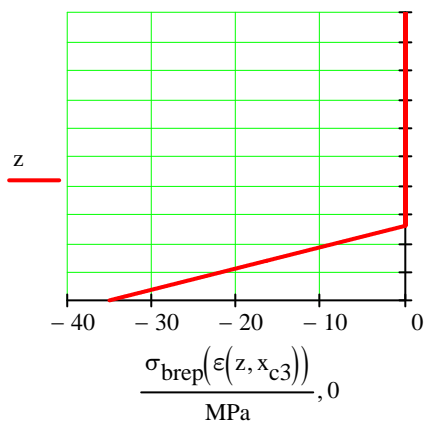
schatwaarde drukzonehoogte $x := 0.5 \cdot h$

Given

$$N'_b(x) + N_{sb}(x) + N_{so}(x) = 0$$

$$x_{c3} := \text{Find}(x) \quad x_{c3} = 41.4 \cdot \text{mm}$$

$$z := 0 \text{mm}, 0.1 \text{mm} \dots h$$



drukkracht beton $N'_b(x_{c3}) = -725 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

kromming $\kappa_{c3} := \frac{-\epsilon_{c3}}{x_{c3}} = 0.042 \frac{1}{\text{m}}$

normaalkracht in bovenwapening $N_{sb}(x_{c3}) = 759 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$ $\sigma_{c3} := \frac{N_{sb}(x_{c3})}{A_{sb}} = 504 \cdot \text{MPa}$

representatief moment

$$M_{c3} := \int_0^h \sigma_{brep}(\epsilon(z, x_{rep})) \cdot z dz + d_o \cdot N_{so}(x_{rep}) + d_b \cdot N_{sb}(x_{rep}) \quad M_{c3} = 85 \cdot \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$$

lineaire relatie tussen kromming en staalspanning

$$\sigma_{s\kappa}(\kappa) := \frac{\kappa}{\kappa_{c3}} \cdot \sigma_{c3}$$

lineaire relatie tussen moment en staalspanning

$$\sigma_{sM}(M) := \frac{M}{M_{c3}} \cdot \sigma_{c3}$$

lineaire relatie tussen kromming en betondrukspanning

$$\sigma_{b\kappa}(\kappa) := \frac{\kappa}{\kappa_{c3}} \cdot f_{ck}$$

lineaire relatie tussen moment en betondrukspanning

$$\sigma_{bM}(M) := \frac{M}{M_{c3}} \cdot f_{ck}$$

5.2 Vermoeingsbelasting

hoekverdraaiing door TS1 in aangrenzend veld
in het hart van de rijstrook voor zwaar verkeer

$$\phi_{TS1} = 1.9 \cdot \text{mrad}$$

bijbehorende overspanning aangrenzend veld

$$L_{\text{veld}} = 15.6 \text{ m}$$

equivalente buigstijfheid aansluitend veld

$$EI_{\text{veld}} := \frac{600 \text{ kN} \cdot L_{\text{veld}}^2}{16 \cdot \phi_{TS1}} = 4.80 \times 10^6 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^2$$

afmetingen wielprenten

type A

$$a_A := 0.3 \text{ m} + 2 \cdot 0.12 \text{ m} + h = 0.7 \text{ m}$$

(ROK Tabel 5-7)

$$b_A := 0.25 \text{ m} + 2 \cdot 0.12 \text{ m} + h = 0.65 \text{ m}$$

type B

$$a_B := a_A = 0.7 \text{ m}$$

$$b_B := 0.25 \text{ m} + 0.1 \text{ m} + 0.25 \text{ m} + 2 \cdot 0.12 \text{ m} + h = 1 \text{ m}$$

type C

$$a_C := a_A = 0.7 \text{ m}$$

$$b_C := 0.333 \text{ m} + 2 \cdot 0.12 \text{ m} + h = 0.733 \text{ m}$$

belaste lengte van de voeg

$$a := \min(L_t, a_A) \quad a = 0.7 \text{ m}$$

Voertuigtype 1 (ROK tabel 5-7)

aantal passages over ontwerplevensduur

$$n_1 := 750000 \cdot t_{\text{ref}} = 3.75 \times 10^7$$

aslasten en afmetingen wielprenten

$$i := 0..1$$

$$Q := \begin{pmatrix} 70 \\ 130 \end{pmatrix} \text{ kN} \quad x := \begin{pmatrix} a_A \\ a_B \end{pmatrix} \quad y := \begin{pmatrix} b_A \\ b_B \end{pmatrix}$$

spanningswisselingen door aslasten op voeg

$$p_i := \frac{0.5 \cdot Q_i}{x_i \cdot y_i}$$

$$M_i := \frac{1}{12} \cdot p_i \cdot a^2 \cdot \frac{(6 \cdot L_t^2 - 8 \cdot a \cdot L_t + 3 \cdot a^2)}{L_t^2}$$

$$\sigma_{s_i} := \xi_1 \cdot \sigma_{sM}(M_i) \quad \sigma_s = \begin{pmatrix} 27.5 \\ 33.2 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{b_i} := \xi_1 \cdot \sigma_{bM}(M_i) \quad \sigma_b = \begin{pmatrix} 1.9 \\ 2.3 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

equivalent voertuiggewicht

$$Q_{\text{tot}} := \sum Q = 200 \cdot \text{kN}$$

afstand tussen eerste en laatste as

$$L_{\text{voertuig}} := 4.50 \text{ m}$$

equivalente lijnlast over lengte a

$$q := \frac{Q_{\text{tot}}}{L_{\text{voertuig}}} = 44.4 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

belaste lengte van veld

$$L_{\text{bel}} := \min(L_{\text{voertuig}}, L_{\text{veld}}) = 4.5 \text{ m}$$

hoekverdraaiing vanuit aangrenzend veld

$$\phi := \frac{1}{48} \cdot \frac{q \cdot L_{\text{bel}} \cdot (3 \cdot L_{\text{veld}}^2 - L_{\text{bel}}^2)}{EI_{\text{veld}}} = 0.62 \cdot \text{mrad}$$

kromming en staalspanning

$$\kappa := \xi_2 \cdot \frac{4 \cdot \phi}{L_t}$$

$$\sigma_{s\kappa}(\kappa) = 34.1 \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{s\text{rows}}(\sigma_s) := \sigma_{s\kappa}(\kappa)$$

$$\sigma_{b\kappa}(\kappa) = 2.4 \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{b\text{rows}}(\sigma_b) := \sigma_{b\kappa}(\kappa)$$

resume spanningswisselingen voertuigtype 1

$$\sigma_{s1} := \sigma_s = \begin{pmatrix} 27.5 \\ 33.2 \\ 34.1 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{b1} := \sigma_b = \begin{pmatrix} 1.9 \\ 2.3 \\ 2.4 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

Voertuigtype 2 (ROK tabel 5-7)

aantal passages over ontwerplevensduur

$$n_2 := 600000 \cdot t_{\text{ref}} = 3 \times 10^7$$

aslasten en afmetingen wielprenten

$$i := 0..2$$

$$Q := \begin{pmatrix} 70 \\ 120 \\ 120 \end{pmatrix} \text{ kN} \quad x := \begin{pmatrix} a_A \\ a_B \\ a_B \end{pmatrix} \quad y := \begin{pmatrix} b_A \\ b_B \\ b_B \end{pmatrix}$$

spanningswisselingen door aslasten op voeg

$$p_i := \frac{0.5 \cdot Q_i}{x_i \cdot y_i}$$

$$M_i := \frac{1}{12} \cdot p_i \cdot a^2 \cdot \frac{[6 \cdot (L_t)^2 - 8 \cdot a \cdot L_t + 3 \cdot a^2]}{L_t^2}$$

$$\sigma_s := 0$$

$$\sigma_{s_i} := \xi_1 \cdot \sigma_{sM}(M_i) \quad \sigma_s = \begin{pmatrix} 27.5 \\ 30.6 \\ 30.6 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_b := 0$$

$$\sigma_{b_i} := \xi_1 \cdot \sigma_{bM}(M_i) \quad \sigma_b = \begin{pmatrix} 1.9 \\ 2.1 \\ 2.1 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

equivalent voertuiggewicht

$$Q_{\text{tot}} := \sum Q = 310 \cdot \text{kN}$$

afstand tussen eerste en laatste as

$$L_{\text{voertuig}} := (4.2 + 1.3) \text{ m} = 5.5 \text{ m}$$

equivalente lijnlast over lengte a

$$q := \frac{Q_{\text{tot}}}{L_{\text{voertuig}}} = 56.4 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

belaste lengte van veld

$$L_{\text{bel}} := \min(L_{\text{voertuig}}, L_{\text{veld}}) = 5.5 \text{ m}$$

hoekverdraaiing vanuit aangrenzend veld

$$\phi := \frac{1}{48} \cdot \frac{q \cdot L_{\text{bel}} \cdot \left(3 \cdot L_{\text{veld}}^2 - L_{\text{bel}}^2\right)}{EI_{\text{veld}}} = 0.94 \cdot \text{mrad}$$

kromming en staalspanning

$$\kappa := \xi_2 \cdot \frac{4 \cdot \phi}{L_t}$$

$$\sigma_{s\kappa}(\kappa) = 52.2 \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{s\text{rows}}(\sigma_s) := \sigma_{s\kappa}(\kappa)$$

$$\sigma_{b\kappa}(\kappa) = 3.6 \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{b\text{rows}}(\sigma_b) := \sigma_{b\kappa}(\kappa)$$

resume spanningswisselingen voertuigtype 2

$$\sigma_{s2} := \sigma_s = \begin{pmatrix} 27.5 \\ 30.6 \\ 30.6 \\ 52.2 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{b2} := \sigma_b = \begin{pmatrix} 1.9 \\ 2.1 \\ 2.1 \\ 3.6 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

Voertuigtype 3 (ROK tabel 5-7)

aantal passages over ontwerplevensduur

$$n_3 := 600000 \cdot t_{\text{ref}} = 3 \times 10^7$$

aslasten en afmetingen wielprenten

$$i := 0..4$$

$$Q := \begin{pmatrix} 70 \\ 150 \\ 90 \\ 90 \\ 90 \end{pmatrix} \text{ kN} \quad x := \begin{pmatrix} a_A \\ a_B \\ a_C \\ a_C \\ a_C \end{pmatrix} \quad y := \begin{pmatrix} b_A \\ b_B \\ b_C \\ b_C \\ b_C \end{pmatrix}$$

spanningswisselingen door aslasten op voeg

$$p_i := \frac{0.5 \cdot Q_i}{x_i \cdot y_i}$$

$$M_i := \frac{1}{12} \cdot p_i \cdot a^2 \cdot \frac{\left(6 \cdot L_t^2 - 8 \cdot a \cdot L_t + 3 \cdot a^2\right)}{\left(L_t\right)^2}$$

$$\sigma_s := 0 \quad \sigma_{s_i} := \xi_1 \cdot \sigma_{sM}(M_i) \quad \sigma_s = \begin{pmatrix} 27.5 \\ 38.3 \\ 31.3 \\ 31.3 \\ 31.3 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_b := 0 \quad \sigma_{b_i} := \xi_1 \cdot \sigma_{bM}(M_i) \quad \sigma_b = \begin{pmatrix} 1.9 \\ 2.7 \\ 2.2 \\ 2.2 \\ 2.2 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

equivalent voertuiggewicht

$$Q_{\text{tot}} := \sum Q = 490 \cdot \text{kN}$$

afstand tussen eerste en laatste as

$$L_{\text{voertuig}} := 3.2\text{m} + 5.2\text{m} + 1.3\text{m} + 1.3\text{m} = 11\text{m}$$

equivalente lijnlast over lengte a

$$q := \frac{Q_{\text{tot}}}{L_{\text{voertuig}}} = 44.5 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

belaste lengte van veld

$$L_{\text{bel}} := \min(L_{\text{voertuig}}, L_{\text{veld}}) = 11\text{m}$$

hoekverdraaiing vanuit aangrenzend veld

$$\phi := \frac{1}{48} \cdot \frac{q \cdot L_{\text{bel}} \cdot (3 \cdot L_{\text{veld}}^2 - L_{\text{bel}}^2)}{EI_{\text{veld}}} = 1.29 \cdot \text{mrad}$$

kromming en staalspanning

$$\kappa := \xi_2 \cdot \frac{4 \cdot \phi}{L_t}$$

$$\sigma_{s\kappa}(\kappa) = 71.7 \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{s\text{rows}}(\sigma_s) := \sigma_{s\kappa}(\kappa)$$

$$\sigma_{b\kappa}(\kappa) = 5.0 \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{b\text{rows}}(\sigma_b) := \sigma_{b\kappa}(\kappa)$$

resume spanningswisselingen voertuigtype 3

$$\sigma_{s3} := \sigma_s = \begin{pmatrix} 27.5 \\ 38.3 \\ 31.3 \\ 31.3 \\ 31.3 \\ 71.7 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{b3} := \sigma_b = \begin{pmatrix} 1.9 \\ 2.7 \\ 2.2 \\ 2.2 \\ 2.2 \\ 5 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

Voertuigtype 4 (ROK tabel 5-7)

aantal passages over ontwerplevensduur

$$n_4 := 230000 \cdot t_{\text{ref}} = 1.15 \times 10^7$$

aslasten en afmetingen wielprenten

$$i := 0..7$$

$$Q := \begin{pmatrix} 70 \\ 90 \\ 70 \\ 70 \\ 70 \\ 70 \\ 70 \\ 70 \end{pmatrix} \text{ kN} \quad x := \begin{pmatrix} a_A \\ a_C \\ a_A \\ a_A \\ a_A \\ a_A \\ a_A \\ a_A \end{pmatrix} \quad y := \begin{pmatrix} b_A \\ b_C \\ b_A \\ b_A \\ b_A \\ b_A \\ b_A \\ b_A \end{pmatrix}$$

spanningswisselingen door aslasten op voeg

$$p_i := \frac{0.5 \cdot Q_i}{x_i \cdot y_i}$$

$$M_i := \frac{1}{12} \cdot p_i \cdot a^2 \cdot \frac{(6 \cdot L_t^2 - 8 \cdot a \cdot L_t + 3 \cdot a^2)}{L_t^2}$$

$$\sigma_s := 0$$

$$\sigma_{s_i} := \xi_1 \cdot \sigma_{sM}(M_i) \quad \sigma_s = \begin{pmatrix} 27.5 \\ 31.3 \\ 27.5 \\ 27.5 \\ 27.5 \\ 27.5 \\ 27.5 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_b := 0$$

$$\sigma_{b_i} := \xi_1 \cdot \sigma_{bM}(M_i) \quad \sigma_b = \begin{pmatrix} 1.9 \\ 2.2 \\ 1.9 \\ 1.9 \\ 1.9 \\ 1.9 \\ 1.9 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

equivalent voertuiggewicht

$$Q_{\text{tot}} := \sum Q = 580 \cdot \text{kN}$$

afstand tussen eerste en laatste as

$$L_{\text{voertuig}} := (3.2 + 1.3 + 4.4 + 1.3 + 1.3 + 1.3 + 1.3) \text{m}$$

$$L_{\text{voertuig}} = 14.1 \text{ m}$$

equivalente lijnlast over lengte a

$$q := \frac{Q_{\text{tot}}}{L_{\text{voertuig}}} = 41.1 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

belaste lengte van veld

$$L_{\text{bel}} := \min(L_{\text{voertuig}}, L_{\text{veld}}) = 14.1 \text{ m}$$

hoekverdraaiing vanuit aangrenzend veld

$$\phi := \frac{1}{48} \cdot \frac{q \cdot L_{\text{bel}} \cdot (3 \cdot L_{\text{veld}}^2 - L_{\text{bel}}^2)}{EI_{\text{veld}}} = 1.34 \cdot \text{mrad}$$

kromming en staalspanning

$$\kappa := \xi_2 \cdot \frac{4 \cdot \phi}{L_t}$$

$$\sigma_{s\kappa}(\kappa) = 74.1 \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{s\text{rows}}(\sigma_s) := \sigma_{s\kappa}(\kappa)$$

$$\sigma_{b\kappa}(\kappa) = 5.1 \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{b\text{rows}}(\sigma_b) := \sigma_{b\kappa}(\kappa)$$

resume spanningswisselingen voertuigtype 4

$$\sigma_{s4} := \sigma_s = \begin{pmatrix} 27.5 \\ 31.3 \\ 27.5 \\ 27.5 \\ 27.5 \\ 27.5 \\ 27.5 \\ 74.1 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{b4} := \sigma_b = \begin{pmatrix} 1.9 \\ 2.2 \\ 1.9 \\ 1.9 \\ 1.9 \\ 1.9 \\ 1.9 \\ 5.1 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

Voertuigtype 5 (ROK tabel 5-7)

aantal passages over ontwerplevensduur

$$n_5 := 66000 \cdot t_{\text{ref}} = 3.3 \times 10^6$$

aslasten en afmetingen wielprenten

$$i := 0..7$$

$$Q := \begin{pmatrix} 70 \\ 70 \\ 170 \\ 160 \\ 70 \\ 70 \\ 70 \\ 70 \end{pmatrix} \text{ kN} \quad x := \begin{pmatrix} a_A \\ a_A \\ a_B \\ a_B \\ a_A \\ a_A \\ a_A \\ a_A \end{pmatrix} \quad y := \begin{pmatrix} b_A \\ b_A \\ b_B \\ b_B \\ b_A \\ b_A \\ b_A \\ b_A \end{pmatrix}$$

spanningswisselingen door aslasten op voeg

$$p_i := \frac{0.5 \cdot Q_i}{x_i \cdot y_i}$$

$$M_i := \frac{1}{12} \cdot p_i \cdot a^2 \cdot \frac{(6 \cdot L_t^2 - 8 \cdot a \cdot L_t + 3 \cdot a^2)}{(L_t)^2}$$

$$\sigma_s := 0 \quad \sigma_{s_i} := \xi_1 \cdot \sigma_{sM}(M_i) \quad \sigma_s = \begin{pmatrix} 27.5 \\ 27.5 \\ 43.4 \\ 40.8 \\ 27.5 \\ 27.5 \\ 27.5 \\ 27.5 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_b := 0 \quad \sigma_{b_i} := \xi_1 \cdot \sigma_{bM}(M_i) \quad \sigma_b = \begin{pmatrix} 1.9 \\ 1.9 \\ 3.0 \\ 2.8 \\ 1.9 \\ 1.9 \\ 1.9 \\ 1.9 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

equivalent voertuiggewicht

$$Q_{\text{tot}} := \sum Q = 750 \cdot \text{kN}$$

afstand tussen eerste en laatste as

$$L_{\text{voertuig}} := (1.5 + 2.4 + 1.3 + 9.5 + 1.3 + 1.3 + 1.3) \text{ m}$$

$$L_{\text{voertuig}} = 18.6 \text{ m}$$

equivalente lijnlast over lengte a

$$q := \frac{Q_{\text{tot}}}{L_{\text{voertuig}}} = 40.3 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

belaste lengte van veld

$$L_{\text{bel}} := \min(L_{\text{voertuig}}, L_{\text{veld}}) = 15.6 \text{ m}$$

hoekverdraaiing vanuit aangrenzend veld

$$\phi := \frac{1}{48} \cdot \frac{q \cdot L_{\text{bel}} \cdot (3 \cdot L_{\text{veld}}^2 - L_{\text{bel}}^2)}{EI_{\text{veld}}} = 1.33 \cdot \text{mrad}$$

kromming en staalspanning

$$\kappa := \xi_2 \cdot \frac{4 \cdot \phi}{L_t}$$

$$\sigma_{s\kappa}(\kappa) = 73.6 \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{s\text{rows}}(\sigma_s) := \sigma_{s\kappa}(\kappa)$$

$$\sigma_{b\kappa}(\kappa) = 5.1 \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{b\text{rows}}(\sigma_b) := \sigma_{b\kappa}(\kappa)$$

resume spanningswisselingen voertuigtype 5

$$\sigma_{s5} := \sigma_s = \begin{pmatrix} 27.5 \\ 27.5 \\ 43.4 \\ 40.8 \\ 27.5 \\ 27.5 \\ 27.5 \\ 27.5 \\ 73.6 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{b5} := \sigma_b = \begin{pmatrix} 1.9 \\ 1.9 \\ 3 \\ 2.8 \\ 1.9 \\ 1.9 \\ 1.9 \\ 1.9 \\ 5.1 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

Voertuigtype 6 (ROK tabel 5-7)

aantal passages over ontwerplevensduur

$$n_6 := 3100 \cdot t_{\text{ref}} = 1.55 \times 10^5$$

aslasten en afmetingen wielprenten

$$i := 0..6$$

$$Q := \begin{pmatrix} 70 \\ 70 \\ 180 \\ 190 \\ 70 \\ 180 \\ 190 \end{pmatrix} \text{ kN} \quad x := \begin{pmatrix} a_A \\ a_A \\ a_B \\ a_B \\ a_A \\ a_B \\ a_B \end{pmatrix} \quad y := \begin{pmatrix} b_A \\ b_A \\ b_B \\ b_B \\ b_A \\ b_B \\ b_B \end{pmatrix}$$

spanningswisselingen door aslasten op voeg

$$p_i := \frac{0.5 \cdot Q_i}{x_i \cdot y_i}$$

$$M_i := \frac{1}{12} \cdot p_i \cdot a^2 \cdot \frac{(6 \cdot L_t^2 - 8 \cdot a \cdot L_t + 3 \cdot a^2)}{L_t^2}$$

$$\sigma_s := 0 \quad \sigma_{s_i} := \xi_1 \cdot \sigma_{sM}(M_i) \quad \sigma_s = \begin{pmatrix} 27.5 \\ 27.5 \\ 45.9 \\ 48.5 \\ 27.5 \\ 45.9 \\ 48.5 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_b := 0 \quad \sigma_{b_i} := \xi_1 \cdot \sigma_{bM}(M_i) \quad \sigma_b = \begin{pmatrix} 1.9 \\ 1.9 \\ 3.2 \\ 3.4 \\ 1.9 \\ 3.2 \\ 3.4 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

equivalent voertuiggewicht

$$Q_{\text{tot}} := \sum Q = 950 \cdot \text{kN}$$

afstand tussen eerste en laatste as

$$L_{\text{voertuig}} := (1.7 + 3.3 + 1.3 + 3.5 + 3.5 + 1.3) \text{m}$$

$$L_{\text{voertuig}} = 14.6 \text{ m}$$

equivalente lijnlast over lengte a

$$q := \frac{Q_{\text{tot}}}{L_{\text{voertuig}}} = 65.1 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

belaste lengte van veld

$$L_{\text{bel}} := \min(L_{\text{voertuig}}, L_{\text{veld}}) = 14.6 \text{ m}$$

hoekverdraaiing vanuit aangrenzend veld

$$\phi := \frac{1}{48} \cdot \frac{q \cdot L_{\text{bel}} \cdot (3 \cdot L_{\text{veld}}^2 - L_{\text{bel}}^2)}{EI_{\text{veld}}} = 2.13 \cdot \text{mrad}$$

kromming en staalspanning

$$\kappa := \xi_2 \cdot \frac{4 \cdot \phi}{L_t} \quad \sigma_{s\kappa}(\kappa) = 118.1 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{s\kappa}(\kappa) = 118.1 \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{s\text{rows}}(\sigma_s) := \sigma_{s\kappa}(\kappa)$$

$$\sigma_{b\kappa}(\kappa) = 8.2 \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{b\text{rows}}(\sigma_b) := \sigma_{b\kappa}(\kappa)$$

resume spanningswisselingen voertuigtype 6

$$\sigma_{s6} := \sigma_s = \begin{pmatrix} 27.5 \\ 27.5 \\ 45.9 \\ 48.5 \\ 27.5 \\ 45.9 \\ 48.5 \\ 118.1 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{b6} := \sigma_b = \begin{pmatrix} 1.9 \\ 1.9 \\ 3.2 \\ 3.4 \\ 1.9 \\ 3.2 \\ 3.4 \\ 8.2 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

Voertuigtype 7 (ROK tabel 5-7)

aantal passages over ontwerplevensduur

$$n_7 := 500 \cdot t_{\text{ref}} = 2.5 \times 10^4$$

aslasten en afmetingen wielprenten

$$i := 0..5$$

$$Q := \begin{pmatrix} 170 \\ 170 \\ 200 \\ 180 \\ 180 \\ 190 \end{pmatrix} \text{ kN} \quad x := \begin{pmatrix} a_B \\ a_B \\ a_B \\ a_B \\ a_B \\ a_B \end{pmatrix} \quad y := \begin{pmatrix} b_B \\ b_B \\ b_B \\ b_B \\ b_B \\ b_B \end{pmatrix}$$

spanningswisselingen door aslasten op voeg

$$p_i := \frac{0.5 \cdot Q_i}{x_i \cdot y_i}$$

$$M_i := \frac{1}{12} \cdot p_i \cdot a^2 \cdot \frac{(6 \cdot L_t^2 - 8 \cdot a \cdot L_t + 3 \cdot a^2)}{L_t^2}$$

$$\sigma_s := 0 \quad \sigma_{s_i} := \xi_1 \cdot \sigma_{sM}(M_i) \quad \sigma_s = \begin{pmatrix} 43.4 \\ 43.4 \\ 51.0 \\ 45.9 \\ 45.9 \\ 48.5 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_b := 0 \quad \sigma_{b_i} := \xi_1 \cdot \sigma_{bM}(M_i) \quad \sigma_b = \begin{pmatrix} 3.0 \\ 3.0 \\ 3.5 \\ 3.2 \\ 3.2 \\ 3.4 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

equivalent voertuiggewicht

$$Q_{\text{tot}} := \sum Q = 1090 \cdot \text{kN}$$

afstand tussen eerste en laatste as

$$L_{\text{voertuig}} := (2.4 + 1.3 + 5.5 + 1.3 + 1.3) \text{ m} = 11.8 \text{ m}$$

equivalente lijnlast over lengte a

$$q := \frac{Q_{\text{tot}}}{L_{\text{voertuig}}} = 92.4 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

belaste lengte van veld

$$L_{\text{bel}} := \min(L_{\text{voertuig}}, L_{\text{veld}}) = 11.8 \text{ m}$$

hoekverdraaiing vanuit aangrenzend veld

$$\phi := \frac{1}{48} \cdot \frac{q \cdot L_{\text{bel}} \cdot (3 \cdot L_{\text{veld}}^2 - L_{\text{bel}}^2)}{EI_{\text{veld}}} = 2.79 \cdot \text{mrad}$$

kromming en staalspanning

$$\kappa := \xi_2 \cdot \frac{4 \cdot \phi}{L_t}$$

$$\sigma_{s\kappa}(\kappa) = 154.8 \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{s\text{rows}}(\sigma_s) := \sigma_{s\kappa}(\kappa)$$

$$\sigma_{b\kappa}(\kappa) = 10.8 \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{b\text{rows}}(\sigma_b) := \sigma_{b\kappa}(\kappa)$$

resume spanningswisselingen voertuigtype 7

$$\sigma_{s7} := \sigma_s = \begin{pmatrix} 43.4 \\ 43.4 \\ 51.0 \\ 45.9 \\ 45.9 \\ 48.5 \\ 154.8 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{b7} := \sigma_b = \begin{pmatrix} 3.0 \\ 3.0 \\ 3.5 \\ 3.2 \\ 3.2 \\ 3.4 \\ 10.8 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

Voertuigtype 8 (ROK tabel 5-7)

aantal passages over ontwerplevensduur

$$n_8 := 200 \cdot t_{\text{ref}} = 1 \times 10^4$$

aslasten en afmetingen wielprenten

$$i := 0..6$$

$$Q := \begin{pmatrix} 130 \\ 160 \\ 170 \\ 220 \\ 200 \\ 170 \\ 170 \end{pmatrix} \text{ kN} \quad x := \begin{pmatrix} a_B \\ a_B \\ a_B \\ a_B \\ a_B \\ a_B \\ a_B \end{pmatrix} \quad y := \begin{pmatrix} b_B \\ b_B \\ b_B \\ b_B \\ b_B \\ b_B \\ b_B \end{pmatrix}$$

spanningswisselingen door aslasten op voeg

$$p_i := \frac{0.5 \cdot Q_i}{x_i \cdot y_i}$$

$$M_i := \frac{1}{12} \cdot p_i \cdot a^2 \cdot \frac{(6 \cdot L_t^2 - 8 \cdot a \cdot L_t + 3 \cdot a^2)}{L_t^2}$$

$$\sigma_s := 0 \quad \sigma_{s_i} := \xi_1 \cdot \sigma_{sM}(M_i) \quad \sigma_s = \begin{pmatrix} 33.2 \\ 40.8 \\ 43.4 \\ 56.1 \\ 51.0 \\ 43.4 \\ 43.4 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_b := 0 \quad \sigma_{b_i} := \xi_1 \cdot \sigma_{bM}(M_i) \quad \sigma_b = \begin{pmatrix} 2.3 \\ 2.8 \\ 3.0 \\ 3.9 \\ 3.5 \\ 3.0 \\ 3.0 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

equivalent voertuiggewicht

$$Q_{\text{tot}} := \sum Q = 1220 \cdot \text{kN}$$

afstand tussen eerste en laatste as

$$L_{\text{voertuig}} := (2.5 + 1.3 + 5.2 + 1.3 + 1.3 + 1.3) \text{m} = 12.9 \text{m}$$

equivalente lijnlast over lengte a

$$q := \frac{Q_{\text{tot}}}{L_{\text{voertuig}}} = 94.6 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

belaste lengte van veld

$$L_{\text{bel}} := \min(L_{\text{voertuig}}, L_{\text{veld}}) = 12.9 \text{m}$$

hoekverdraaiing vanuit aangrenzend veld

$$\phi := \frac{1}{48} \cdot \frac{q \cdot L_{\text{bel}} \cdot (3 \cdot L_{\text{veld}}^2 - L_{\text{bel}}^2)}{EI_{\text{veld}}} = 2.98 \cdot \text{mrad}$$

kromming en staalspanning

$$\kappa := \xi_2 \cdot \frac{4 \cdot \phi}{L_t}$$

$$\sigma_{s\kappa}(\kappa) = 165.3 \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{s\text{rows}}(\sigma_s) := \sigma_{s\kappa}(\kappa)$$

$$\sigma_{b\kappa}(\kappa) = 11.5 \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{b\text{rows}}(\sigma_b) := \sigma_{b\kappa}(\kappa)$$

resume spanningswisselingen voertuigtype 8

$$\sigma_{s8} := \sigma_s = \begin{pmatrix} 33.2 \\ 40.8 \\ 43.4 \\ 56.1 \\ 51.0 \\ 43.4 \\ 43.4 \\ 165.3 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{b8} := \sigma_b = \begin{pmatrix} 2.3 \\ 2.8 \\ 3.0 \\ 3.9 \\ 3.5 \\ 3.0 \\ 3.0 \\ 11.5 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

Voertuigtype 9 (ROK tabel 5-7)

aantal passages over ontwerplevensduur

$$n_9 := 100 \cdot t_{\text{ref}} = 5 \times 10^3$$

aslasten en afmetingen wielprenten

$$i := 0..6$$

$$Q := \begin{pmatrix} 130 \\ 130 \\ 180 \\ 180 \\ 220 \\ 220 \\ 220 \end{pmatrix} \text{ kN} \quad x := \begin{pmatrix} a_B \\ a_B \\ a_B \\ a_B \\ a_B \\ a_B \\ a_B \end{pmatrix} \quad y := \begin{pmatrix} b_B \\ b_B \\ b_B \\ b_B \\ b_B \\ b_B \\ b_B \end{pmatrix}$$

spanningswisselingen door aslasten op voeg

$$p_i := \frac{0.5 \cdot Q_i}{x_i \cdot y_i}$$

$$M_i := \frac{1}{12} \cdot p_i \cdot a^2 \cdot \frac{(6 \cdot L_t^2 - 8 \cdot a \cdot L_t + 3 \cdot a^2)}{L_t^2}$$

$$\sigma_s := 0$$

$$\sigma_{s_i} := \xi_1 \cdot \sigma_{sM}(M_i) \quad \sigma_s = \begin{pmatrix} 33.2 \\ 33.2 \\ 45.9 \\ 45.9 \\ 56.1 \\ 56.1 \\ 56.1 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_b := 0$$

$$\sigma_{b_i} := \xi_1 \cdot \sigma_{bM}(M_i) \quad \sigma_b = \begin{pmatrix} 2.3 \\ 2.3 \\ 3.2 \\ 3.2 \\ 3.9 \\ 3.9 \\ 3.9 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

equivalent voertuiggewicht

$$Q_{\text{tot}} := \sum Q = 1280 \cdot \text{kN}$$

afstand tussen eerste en laatste as

$$L_{\text{voertuig}} := (1.4 + 2.6 + 1.3 + 6.1 + 1.9 + 1.9) \text{m} = 15.2 \text{m}$$

equivalente lijnlast over lengte a

$$q := \frac{Q_{\text{tot}}}{L_{\text{voertuig}}} = 84.2 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

belaste lengte van veld

$$L_{\text{bel}} := \min(L_{\text{voertuig}}, L_{\text{veld}}) = 15.2 \text{m}$$

hoekverdraaiing vanuit aangrenzend veld

$$\phi := \frac{1}{48} \cdot \frac{q \cdot L_{\text{bel}} \cdot (3 \cdot L_{\text{veld}}^2 - L_{\text{bel}}^2)}{EI_{\text{veld}}} = 2.77 \cdot \text{mrad}$$

kromming en staalspanning

$$\kappa := \xi_2 \cdot \frac{4 \cdot \phi}{L_t}$$

$$\sigma_{s\kappa}(\kappa) = 153.6 \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{s\text{rows}}(\sigma_s) := \sigma_{s\kappa}(\kappa)$$

$$\sigma_{b\kappa}(\kappa) = 10.7 \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{b\text{rows}}(\sigma_b) := \sigma_{b\kappa}(\kappa)$$

resume spanningswisselingen voertuigtype 9

$$\sigma_{s9} := \sigma_s = \begin{pmatrix} 33.2 \\ 33.2 \\ 45.9 \\ 45.9 \\ 56.1 \\ 56.1 \\ 56.1 \\ 153.6 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{b9} := \sigma_b = \begin{pmatrix} 2.3 \\ 2.3 \\ 3.2 \\ 3.2 \\ 3.9 \\ 3.9 \\ 3.9 \\ 10.7 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

Voertuigtype 10 (ROK tabel 5-7)

aantal passages over ontwerplevensduur

$$n_{10} := 100 \cdot t_{\text{ref}} = 5 \times 10^3$$

aslasten en afmetingen wielprenten

$$i := 0..6$$

$$Q := \begin{pmatrix} 90 \\ 90 \\ 240 \\ 220 \\ 200 \\ 180 \\ 190 \\ 200 \end{pmatrix} \text{ kN} \quad x := \begin{pmatrix} a_C \\ a_C \\ a_B \\ a_B \\ a_B \\ a_B \\ a_B \\ a_B \end{pmatrix} \quad y := \begin{pmatrix} b_C \\ b_C \\ b_B \\ b_B \\ b_B \\ b_B \\ b_B \\ b_B \end{pmatrix}$$

spanningswisselingen door aslasten op voeg

$$p_i := \frac{0.5 \cdot Q_i}{x_i \cdot y_i}$$

$$M_i := \frac{1}{12} \cdot p_i \cdot a^2 \cdot \frac{(6 \cdot L_t^2 - 8 \cdot a \cdot L_t + 3 \cdot a^2)}{L_t^2}$$

$$\sigma_s := 0 \quad \sigma_{s_i} := \xi_1 \cdot \sigma_{sM}(M_i) \quad \sigma_s = \begin{pmatrix} 31.3 \\ 31.3 \\ 61.2 \\ 56.1 \\ 51.0 \\ 45.9 \\ 48.5 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_b := 0 \quad \sigma_{b_i} := \xi_1 \cdot \sigma_{bM}(M_i) \quad \sigma_b = \begin{pmatrix} 2.2 \\ 2.2 \\ 4.3 \\ 3.9 \\ 3.5 \\ 3.2 \\ 3.4 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

equivalent voertuiggewicht

$$Q_{\text{tot}} := \sum Q = 1410 \cdot \text{kN}$$

afstand tussen eerste en laatste as

$$L_{\text{voertuig}} := (2.4 + 1.3 + 1.3 + 9.5 + 1.3 + 1.3 + 1.3) \text{ m}$$

$$L_{\text{voertuig}} = 18.4 \text{ m}$$

equivalente lijnlast over lengte a

$$q := \frac{Q_{\text{tot}}}{L_{\text{voertuig}}} = 76.6 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

belaste lengte van veld

$$L_{\text{bel}} := \min(L_{\text{voertuig}}, L_{\text{veld}}) = 15.6 \text{ m}$$

hoekverdraaiing vanuit aangrenzend veld

$$\phi := \frac{1}{48} \cdot \frac{q \cdot L_{\text{bel}} \cdot \left(3 \cdot L_{\text{veld}}^2 - L_{\text{bel}}^2 \right)}{EI_{\text{veld}}} = 2.52 \cdot \text{mrad}$$

kromming en staalspanning

$$\kappa := \xi_2 \cdot \frac{4 \cdot \phi}{L_t}$$

$$\sigma_{s\kappa}(\kappa) = 139.9 \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{s\text{rows}}(\sigma_s) := \sigma_{s\kappa}(\kappa)$$

$$\sigma_{b\kappa}(\kappa) = 9.7 \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{b\text{rows}}(\sigma_b) := \sigma_{b\kappa}(\kappa)$$

resume spanningswisselingen voertuigtype 10

$$\sigma_{s10} := \sigma_s = \begin{pmatrix} 31.3 \\ 31.3 \\ 61.2 \\ 56.1 \\ 51.0 \\ 45.9 \\ 48.5 \\ 139.9 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad \sigma_{b10} := \sigma_b = \begin{pmatrix} 2.2 \\ 2.2 \\ 4.3 \\ 3.9 \\ 3.5 \\ 3.2 \\ 3.4 \\ 9.7 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

5.3 Vermoeiingsschade volgens Miner

SN-curve betonstaal
(NEN-EN 1992-1-1, 6.8.4)

NEN-EN 1992-1-1, 6.8.4 en NEN-EN 1992-2, 6.8.7

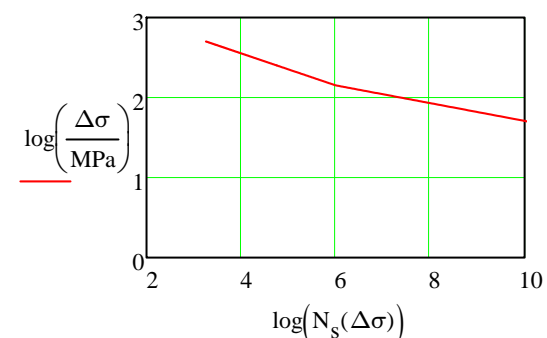
$$k_1 := 5 \quad k_2 := 9$$

$$\Delta\sigma_{\text{Rsk}} := 162.5 \text{MPa} \quad \gamma_{s,\text{fat}} := 1.15$$

$$N_{\text{ster}} := 10^6$$

$$N_s(\Delta\sigma) := \begin{cases} \left(\frac{\Delta\sigma_{\text{Rsk}}}{\gamma_{s,\text{fat}} \cdot \Delta\sigma} \right)^{k_1} \cdot N_{\text{ster}} & \text{if } \Delta\sigma \geq \frac{\Delta\sigma_{\text{Rsk}}}{\gamma_{s,\text{fat}}} \\ \left(\frac{\Delta\sigma_{\text{Rsk}}}{\gamma_{s,\text{fat}} \cdot \Delta\sigma} \right)^{k_2} \cdot N_{\text{ster}} & \text{if } \Delta\sigma < \frac{\Delta\sigma_{\text{Rsk}}}{\gamma_{s,\text{fat}}} \end{cases}$$

$$\Delta\sigma := 0 \text{MPa}, 1 \text{MPa} \dots f_{yk}$$



SN-curve beton onder druk
(NEN-EN 1992-2, 6.8.7)

$$k_1 := 1.0 \quad \beta_{cc} := 1.0$$

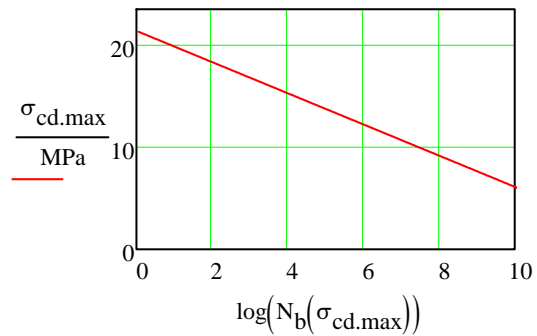
$$f_{cd,\text{fat}} := k_1 \cdot \beta_{cc} \cdot f_{cd} \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{400 \text{MPa}} \right)$$

$$f_{cd.fat} = 21.3 \cdot \text{MPa}$$

De minimale drukspanning is 0 MPa. Hieruit volgt:

$$N_b(\sigma_{cd.max}) := 10^{14 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{cd.max}}{f_{cd.fat}}\right)}$$

$$\sigma_{cd.max} := 0 \text{MPa}, 0.1 \text{MPa} .. f_{cd.fat}$$



Voertuigtype 1

$$n_1 = 3.75 \times 10^7 \quad i := 0..2$$

$$\sigma_{s1} = \begin{pmatrix} 27.5 \\ 33.2 \\ 34.1 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad N_{1_i} := N_s(\sigma_{s1_i}) \quad D_{s1} := \frac{n_1}{N_1} = \begin{pmatrix} 1.48 \times 10^{-5} \\ 8.07 \times 10^{-5} \\ 1.05 \times 10^{-4} \end{pmatrix} \quad \sum D_{s1} = 2.00 \times 10^{-4}$$

$$\sigma_{b1} = \begin{pmatrix} 1.9 \\ 2.3 \\ 2.4 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad N_{1_i} := N_b(\sigma_{b1_i}) \quad D_{b1} := \frac{n_1}{N_1} = \begin{pmatrix} 6.75 \times 10^{-6} \\ 1.23 \times 10^{-5} \\ 1.36 \times 10^{-5} \end{pmatrix} \quad \sum D_{b1} = 3.26 \times 10^{-5}$$

Voertuigtype 2

$$n_2 = 3 \times 10^7 \quad i := 0..3$$

$$\sigma_{s2} = \begin{pmatrix} 27.5 \\ 30.6 \\ 30.6 \\ 52.2 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad N_{2_i} := N_s(\sigma_{s2_i}) \quad D_{s2} := \frac{n_2}{N_2} = \begin{pmatrix} 1.19 \times 10^{-5} \\ 3.14 \times 10^{-5} \\ 3.14 \times 10^{-5} \\ 3.81 \times 10^{-3} \end{pmatrix} \quad \sum D_{s2} = 3.89 \times 10^{-3}$$

$$\sigma_{b2} = \begin{pmatrix} 1.9 \\ 2.1 \\ 2.1 \\ 3.6 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad N_{2_i} := N_b(\sigma_{b2_i}) \quad D_{b2} := \frac{n_2}{N_2} = \begin{pmatrix} 5.4 \times 10^{-6} \\ 7.51 \times 10^{-6} \\ 7.51 \times 10^{-6} \\ 7.26 \times 10^{-5} \end{pmatrix} \quad \sum D_{b2} = 9.30 \times 10^{-5}$$

Voertuigtype 3

$$n_3 = 3 \times 10^7 \quad i := 0..5$$

$$\sigma_{s3} = \begin{pmatrix} 27.5 \\ 38.3 \\ 31.3 \\ 31.3 \\ 31.3 \\ 71.7 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad N_{3_i} := N_s(\sigma_{s3_i}) \quad D_{s3} := \frac{n_3}{N_3} = \begin{pmatrix} 1.19 \times 10^{-5} \\ 2.34 \times 10^{-4} \\ 3.86 \times 10^{-5} \\ 3.86 \times 10^{-5} \\ 3.86 \times 10^{-5} \\ 0.07 \end{pmatrix} \quad \sum D_{s3} = 0.07$$

$$\sigma_{b3} = \begin{pmatrix} 1.9 \\ 2.7 \\ 2.2 \\ 2.2 \\ 2.2 \\ 5.0 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad N_{3_i} := N_b(\sigma_{b3_i}) \quad D_{b3} := \frac{n_3}{N_3} = \begin{pmatrix} 5.4 \times 10^{-6} \\ 1.68 \times 10^{-5} \\ 8.09 \times 10^{-6} \\ 8.09 \times 10^{-6} \\ 8.09 \times 10^{-6} \\ 5.71 \times 10^{-4} \end{pmatrix} \quad \sum D_{b3} = 6.17 \times 10^{-4}$$

Voertuigtype 4

$$n_4 = 1.15 \times 10^8 \quad i := 0..8$$

$$\sigma_{s4} = \begin{pmatrix} 27.5 \\ 31.3 \\ 27.5 \\ 27.5 \\ 27.5 \\ 27.5 \\ 27.5 \\ 27.5 \\ 74.1 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad N_{4_i} := N_s(\sigma_{s4_i}) \quad D_{s4} := \frac{n_4}{N_4} = \begin{pmatrix} 4.55 \times 10^{-6} \\ 1.48 \times 10^{-5} \\ 4.55 \times 10^{-6} \\ 4.55 \times 10^{-6} \\ 4.55 \times 10^{-6} \\ 4.55 \times 10^{-6} \\ 4.55 \times 10^{-6} \\ 4.55 \times 10^{-6} \\ 0.03 \end{pmatrix} \quad \sum D_{s4} = 0.03$$

$$\sigma_{b4} = \begin{pmatrix} 1.9 \\ 2.2 \\ 1.9 \\ 1.9 \\ 1.9 \\ 1.9 \\ 1.9 \\ 1.9 \\ 5.1 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad N_{4_i} := N_b(\sigma_{b4_i}) \quad D_{b4} := \frac{n_4}{N_4} = \begin{pmatrix} 2.07 \times 10^{-6} \\ 3.1 \times 10^{-6} \\ 2.07 \times 10^{-6} \\ 2.07 \times 10^{-6} \\ 2.07 \times 10^{-6} \\ 2.07 \times 10^{-6} \\ 2.07 \times 10^{-6} \\ 2.07 \times 10^{-6} \\ 2.8 \times 10^{-4} \end{pmatrix} \quad \sum D_{b4} = 2.97 \times 10^{-4}$$

Voertuigtype 5

$$n_5 = 3.3 \times 10^6 \quad i := 0..8$$

$$\sigma_{s5} = \begin{pmatrix} 27.5 \\ 27.5 \\ 43.4 \\ 40.8 \\ 27.5 \\ 27.5 \\ 27.5 \\ 27.5 \\ 73.6 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad N_{5_i} := N_s(\sigma_{s5_i}) \quad D_{s5} := \frac{n_5}{N_5} = \begin{pmatrix} 1.31 \times 10^{-6} \\ 1.31 \times 10^{-6} \\ 7.94 \times 10^{-5} \\ 4.6 \times 10^{-5} \\ 1.31 \times 10^{-6} \\ 1.31 \times 10^{-6} \\ 1.31 \times 10^{-6} \\ 1.31 \times 10^{-6} \\ 9.32 \times 10^{-3} \end{pmatrix} \quad \sum D_{s5} = 9.45 \times 10^{-3}$$

$$\sigma_{b5} = \begin{pmatrix} 1.9 \\ 1.9 \\ 3.0 \\ 2.8 \\ 1.9 \\ 1.9 \\ 1.9 \\ 1.9 \\ 5.1 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad N_{5_i} := N_b(\sigma_{b5_i}) \quad D_{b5} := \frac{n_5}{N_5} = \begin{pmatrix} 5.94 \times 10^{-7} \\ 5.94 \times 10^{-7} \\ 3.16 \times 10^{-6} \\ 2.42 \times 10^{-6} \\ 5.94 \times 10^{-7} \\ 5.94 \times 10^{-7} \\ 5.94 \times 10^{-7} \\ 5.94 \times 10^{-7} \\ 7.63 \times 10^{-5} \end{pmatrix} \quad \sum D_{b5} = 8.55 \times 10^{-5}$$

Voertuigtype 6

$$n_6 = 1.55 \times 10^5 \quad i := 0..7$$

$$\sigma_{s6} = \begin{pmatrix} 27.5 \\ 27.5 \\ 45.9 \\ 48.5 \\ 27.5 \\ 45.9 \\ 48.5 \\ 118.1 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad N_{6_i} := N_s(\sigma_{s6_i}) \quad D_{s6} := \frac{n_6}{N_6} = \begin{pmatrix} 6.13 \times 10^{-8} \\ 6.13 \times 10^{-8} \\ 6.24 \times 10^{-6} \\ 1.02 \times 10^{-5} \\ 6.13 \times 10^{-8} \\ 6.24 \times 10^{-6} \\ 1.02 \times 10^{-5} \\ 0.03 \end{pmatrix} \quad \sum D_{s6} = 0.03$$

$$\sigma_{b6} = \begin{pmatrix} 1.9 \\ 1.9 \\ 3.2 \\ 3.4 \\ 1.9 \\ 3.2 \\ 3.4 \\ 8.2 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad N_{6_i} := N_b(\sigma_{b6_i}) \quad D_{b6} := \frac{n_6}{N_6} = \begin{pmatrix} 2.79 \times 10^{-8} \\ 2.79 \times 10^{-8} \\ 1.94 \times 10^{-7} \\ 2.54 \times 10^{-7} \\ 2.79 \times 10^{-8} \\ 1.94 \times 10^{-7} \\ 2.54 \times 10^{-7} \\ 3.86 \times 10^{-4} \end{pmatrix} \quad \sum D_{b6} = 3.87 \times 10^{-4}$$

Voertuigtype 7

$$n_7 = 2.5 \times 10^4 \quad i := 0..6$$

$$\sigma_{s7} = \begin{pmatrix} 43.4 \\ 43.4 \\ 51.0 \\ 45.9 \\ 45.9 \\ 48.5 \\ 154.8 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad N_{7_i} := N_s(\sigma_{s7_i}) \quad D_{s7} := \frac{n_7}{N_7} = \begin{pmatrix} 6.02 \times 10^{-7} \\ 6.02 \times 10^{-7} \\ 2.6 \times 10^{-6} \\ 1.01 \times 10^{-6} \\ 1.01 \times 10^{-6} \\ 1.64 \times 10^{-6} \\ 0.04 \end{pmatrix} \quad \sum D_{s7} = 0.04$$

$$\sigma_{b7} = \begin{pmatrix} 3.0 \\ 3.0 \\ 3.5 \\ 3.2 \\ 3.2 \\ 3.4 \\ 10.8 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad N_{7_i} := N_b(\sigma_{b7_i}) \quad D_{b7} := \frac{n_7}{N_7} = \begin{pmatrix} 2.39 \times 10^{-8} \\ 2.39 \times 10^{-8} \\ 5.36 \times 10^{-8} \\ 3.13 \times 10^{-8} \\ 3.13 \times 10^{-8} \\ 4.1 \times 10^{-8} \\ 2.98 \times 10^{-3} \end{pmatrix} \quad \sum D_{b7} = 2.98 \times 10^{-3}$$

Voertuigtype 8

$$n_8 = 1 \times 10^4 \quad i := 0..7$$

$$\sigma_{s8} = \begin{pmatrix} 33.2 \\ 40.8 \\ 43.4 \\ 56.1 \\ 51.0 \\ 43.4 \\ 43.4 \\ 165.3 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad N_{8_i} := N_s(\sigma_{s8_i}) \quad D_{s8} := \frac{n_8}{N_8} = \begin{pmatrix} 2.15 \times 10^{-8} \\ 1.4 \times 10^{-7} \\ 2.41 \times 10^{-7} \\ 2.45 \times 10^{-6} \\ 1.04 \times 10^{-6} \\ 2.41 \times 10^{-7} \\ 2.41 \times 10^{-7} \\ 0.02 \end{pmatrix} \quad \sum D_{s8} = 0.02$$

$$\sigma_{b8} = \begin{pmatrix} 2.3 \\ 2.8 \\ 3.0 \\ 3.9 \\ 3.5 \\ 3.0 \\ 3.0 \\ 11.5 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad N_{8_i} := N_b(\sigma_{b8_i}) \quad D_{b8} := \frac{n_8}{N_8} = \begin{pmatrix} 3.27 \times 10^{-9} \\ 7.32 \times 10^{-9} \\ 9.58 \times 10^{-9} \\ 3.67 \times 10^{-8} \\ 2.14 \times 10^{-8} \\ 9.58 \times 10^{-9} \\ 9.58 \times 10^{-9} \\ 3.6 \times 10^{-3} \end{pmatrix} \quad \sum D_{b8} = 3.60 \times 10^{-3}$$

Voertuigtype 9

$$n_9 = 5 \times 10^3$$

$$i := 0..7$$

$$\sigma_{s9} = \begin{pmatrix} 33.2 \\ 33.2 \\ 45.9 \\ 45.9 \\ 56.1 \\ 56.1 \\ 56.1 \\ 153.6 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

$$N_{9i} := N_s(\sigma_{s9i})$$

$$D_{s9} := \frac{n_9}{N_9} = \begin{pmatrix} 1.08 \times 10^{-8} \\ 1.08 \times 10^{-8} \\ 2.01 \times 10^{-7} \\ 2.01 \times 10^{-7} \\ 1.23 \times 10^{-6} \\ 1.23 \times 10^{-6} \\ 1.23 \times 10^{-6} \\ 7.58 \times 10^{-3} \end{pmatrix}$$

$$\sum D_{s9} = 7.58 \times 10^{-3}$$

$$\sigma_{b9} = \begin{pmatrix} 2.3 \\ 2.3 \\ 3.2 \\ 3.2 \\ 3.9 \\ 3.9 \\ 3.9 \\ 10.7 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

$$N_{9i} := N_b(\sigma_{b9i})$$

$$D_{b9} := \frac{n_9}{N_9} = \begin{pmatrix} 1.64 \times 10^{-9} \\ 1.64 \times 10^{-9} \\ 6.26 \times 10^{-9} \\ 6.26 \times 10^{-9} \\ 1.83 \times 10^{-8} \\ 1.83 \times 10^{-8} \\ 1.83 \times 10^{-8} \\ 5.22 \times 10^{-4} \end{pmatrix}$$

$$\sum D_{b9} = 5.22 \times 10^{-4}$$

Voertuigtype 10

$$n_{10} = 5 \times 10^3$$

$$i := 0..7$$

$$\sigma_{s10} = \begin{pmatrix} 31.3 \\ 31.3 \\ 61.2 \\ 56.1 \\ 51.0 \\ 45.9 \\ 48.5 \\ 139.9 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa}$$

$$N_{10i} := N_s(\sigma_{s10i})$$

$$D_{s10} := \frac{n_{10}}{N_{10}} = \begin{pmatrix} 6.44 \times 10^{-9} \\ 6.44 \times 10^{-9} \\ 2.68 \times 10^{-6} \\ 1.23 \times 10^{-6} \\ 5.2 \times 10^{-7} \\ 2.01 \times 10^{-7} \\ 3.28 \times 10^{-7} \\ 4.56 \times 10^{-3} \end{pmatrix}$$

$$\sum D_{s10} = 4.57 \times 10^{-3}$$

$$\sigma_{b10} = \begin{pmatrix} 2.2 \\ 2.2 \\ 4.3 \\ 3.9 \\ 3.5 \\ 3.2 \\ 3.4 \\ 9.7 \end{pmatrix} \cdot \text{MPa} \quad N_{10_i} := N_b(\sigma_{b10_i}) \quad D_{b10} := \frac{n_{10}}{N_{10}} = \begin{pmatrix} 1.35 \times 10^{-9} \\ 1.35 \times 10^{-9} \\ 3.13 \times 10^{-8} \\ 1.83 \times 10^{-8} \\ 1.07 \times 10^{-8} \\ 6.26 \times 10^{-9} \\ 8.19 \times 10^{-9} \\ 1.24 \times 10^{-4} \end{pmatrix} \quad \sum D_{b10} = 1.24 \times 10^{-4}$$

5.4 Vermoeingstoetsen

Totale vermoeingsschade betonstaal

$$D_s := \sum D_{s1} + \sum D_{s2} + \sum D_{s3} + \sum D_{s4} + \sum D_{s5} + \sum D_{s6} + \sum D_{s7} + \sum D_{s8} + \sum D_{s9} + \sum D_{s10}$$

$$\boxed{uc_7 := D_s = 0.22}$$

Totale vermoeingsschade beton onder druk

$$D_b := \sum D_{b1} + \sum D_{b2} + \sum D_{b3} + \sum D_{b4} + \sum D_{b5} + \sum D_{b6} + \sum D_{b7} + \sum D_{b8} + \sum D_{b9} + \sum D_{b10}$$

$$\boxed{uc_8 := D_b = 0.009}$$

6. Detaillingsregels

6.1 Tussenafstanden

NEN-EN 1992-1-1, art. 8.2 (2)

maximale staafdiameter $\varnothing_{\max} := \max(\varnothing_b, \varnothing_o, \varnothing_{\text{dwars}})$ $\varnothing_{\max} = 12\text{-mm}$

factor k_1 $k_1 := 1$

waarde k_2 $k_2 := 5\text{mm}$

vereiste verticale tussenafstand $s_{\min.v} := \max(k_1 \cdot \varnothing_{\max}, d_g + k_2, 20\text{mm})$

$$s_{\min.v} = 21\text{-mm}$$

aanwezige verticale tussenafstand $s_{\text{vert}} := h - c_b - \varnothing_b - c_o - \varnothing_o - 2 \cdot \varnothing_{\text{dwars}} = 29\text{-mm}$

controle verticale tussenafstand $\text{controle3} := \begin{cases} \text{"voldoet"} & \text{if } s_{\text{vert}} \geq s_{\min.v} \\ \text{"voldoet niet"} & \text{otherwise} \end{cases}$

controle3 = "voldoet"

vereiste horizontale tussenafstand $s_{\min.b} := \max(k_1 \cdot \varnothing_b, d_g + k_2, 20\text{mm})$

$$s_{\min.b} = 21\text{-mm}$$

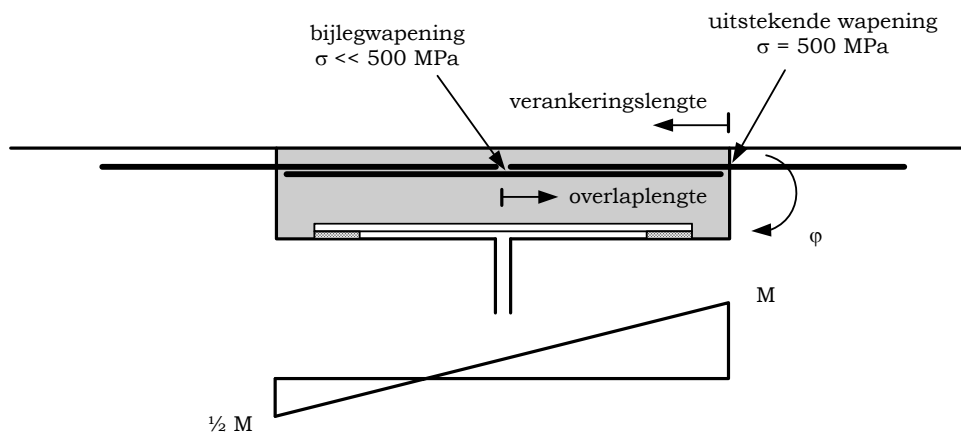
aanwezige horizontale tussenafstand $s_{\text{hor}} := s_b - 2 \cdot \varnothing_b = 51\text{-mm}$

controle staafafstand boven $\text{controle4} := \begin{cases} \text{"voldoet"} & \text{if } s_{\text{hor}} \geq s_{\min.b} \\ \text{"voldoet niet"} & \text{otherwise} \end{cases}$

controle4 = "voldoet"

6.2 Verankeringslengte

De minimaal benodigde verankeringslengte (= overlappende) in de voeg is met NEN-EN 1992-1-1, 8.4.2 t/m 8.4.4 bepaald. Daarbij hoeft de toeslag voor overlapping conform 8.7.3 niet in rekening te worden gebracht. Dit is in de figuur geïllustreerd voor kokerliggers, waarbij voegwapening wordt bijgelegd. De overlappende lengte geldt alleen voor de resterende spanning in de bijlegwapening in het midden van de voeg en deze spanning is veel kleiner dan de spanning ter plaatse van de inklemming.



rekenwaarde treksterkte

$$\alpha_{ct} := 1.0$$

$$f_{ctk.0.05} := 0.7 \cdot f_{ctm}$$

$$f_{ctk.0.05} = 2.25 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{ctd} := \frac{\alpha_{ct} \cdot f_{ctk.0.05}}{\gamma_C}$$

$$f_{ctd} = 1.50 \cdot \text{MPa}$$

opneembare aanhechtspanning

$$\eta_1 := 1.0 \quad (\text{goede aanhechtingsomstandigheden})$$

$$\eta_2 := 1.0 \quad (\text{staafdiameter} < 32 \text{ mm})$$

$$f_{bd} := 2.25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctd}$$

$$f_{bd} = 3.37 \cdot \text{MPa}$$

basisverankeringslengte

$$l_{b.rqd} := \frac{\varnothing_b}{4} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{bd}}$$

$$l_{b.rqd} = 387 \cdot \text{mm}$$

bepaling factoren α_1 t/m α_5

$$\alpha_1 := 1.0$$

$$\alpha_3 := 1.0$$

$$\alpha_4 := 1.0$$

$$\alpha_5 := 1.0$$

$$c_d := \min\left(\frac{s_{hor}}{2}, c_b\right)$$

$$c_d = 25.5 \cdot \text{mm}$$

$$\alpha_2 := \begin{cases} \left(1 - 0.15 \cdot \frac{c_d - \varnothing_b}{\varnothing_b}\right) & \text{if } c_d \leq 3 \cdot \varnothing_b \wedge c_d \geq \varnothing_b \\ 0.7 & \text{if } c_d > 3 \cdot \varnothing_b \\ 1.0 & \text{if } c_d < \varnothing_b \end{cases}$$

$$\alpha_2 = 0.83$$

ondergrens verankeringslengte

$$l_{b.min} := \max(0.3 \cdot l_{b.rqd}, 10 \cdot \varnothing_b, 100 \text{mm})$$

$$l_{b.min} = 120 \cdot \text{mm}$$

rekenwaarde verankeringslengte

$$l_{bd} := \max(\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_5 \cdot l_{b.rqd}, l_{b.min})$$

$$l_{bd} = 322 \cdot \text{mm}$$

toets bij kokerliggers

$$\text{controle5} := \begin{cases} \text{"voldoet"} & \text{if } 0.5 \cdot L_t \geq l_{bd} \\ \text{"voldoet niet"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{controle5} = \text{"voldoet"}$$

7. SAMENVATTING

Toets sterkte (UGT/STR)

Buiging en trek

momentcapaciteit	$M_{Ed} = 19.5 \cdot \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$	$M_{Rd} = 49.8 \cdot \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$	$uc_1 = 0.39$
------------------	---	---	---------------

betondrukzonehoogte	$x_u = 32.6 \cdot \text{mm}$	$x_{u\max} = 54.0 \cdot \text{mm}$	$uc_2 = 0.60$
---------------------	------------------------------	------------------------------------	---------------

Dwarskracht en trek

dwarskrachtcapaciteit	$V_{Ed\beta} = 72.3 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$	$V_{Rd.c} = 80.1 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$	$uc_3 = 0.90$
-----------------------	---	--	---------------

betondrukdiagonaal	$V_{Ed} = 113.2 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$	$V_{Rd.\max} = 608.0 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$	$uc_4 = 0.19$
--------------------	---	--	---------------

Toets scheurvorming (BGT)

maximale staalspanning	$\sigma_{skar} = 445 \cdot \text{MPa}$	$\sigma_{\max} = 500 \cdot \text{MPa}$	$uc_5 = 0.89$
------------------------	--	--	---------------

scheurwijdte	$w_k = 0.37 \cdot \text{mm}$	$k_x \cdot w_{\max} = 0.42 \cdot \text{mm}$	$uc_6 = 0.88$
--------------	------------------------------	---	---------------

Toets vermoeiing (UGT/STR)

betonstaal	schade volgens Miner	$D_s = 0.22$	$uc_7 = 0.22$
------------	----------------------	--------------	---------------

beton onder druk	schade volgens Miner	$D_b = 0.0087$	$uc_8 = 0.01$
------------------	----------------------	----------------	---------------

Controle betondekking

bovenzijde	$c_b = 53 \cdot \text{mm}$	$c_{\text{nom.b}} = 50 \cdot \text{mm}$
------------	----------------------------	---

$controle1 = \text{"voldoet"}$

onderzijde	$c_o = 30 \cdot \text{mm}$	$c_{\text{nom.o}} = 30 \cdot \text{mm}$
------------	----------------------------	---

$controle2 = \text{"voldoet"}$

Detaileringseisen

korreldiameter	$d_g = 16 \cdot \text{mm}$
----------------	----------------------------

verticale tussenafstand	$s_{\text{vert}} = 29 \cdot \text{mm}$	$s_{\text{min.v}} = 21 \cdot \text{mm}$
-------------------------	--	---

$controle3 = \text{"voldoet"}$

tussenafstand bovenstaven	$s_{\text{hor}} = 51 \cdot \text{mm}$	$s_{\text{min.b}} = 21 \cdot \text{mm}$
---------------------------	---------------------------------------	---

$controle4 = \text{"voldoet"}$

verankeringslengte (boven) voor kokerliggers	$0.5 \cdot L_t = 430 \cdot \text{mm}$	$l_{bd} = 322 \cdot \text{mm}$
---	---------------------------------------	--------------------------------

$controle5 = \text{"voldoet"}$