

2018

CTB-3000 Bsc eindwerk

Beton: Uitkragende betonvloeren ("balkons")

Daan Bourgonje

4460189

Bsc Eindwerk: Eindrapport “Beton: Uitkragende betonvloeren(“balkons”)”
Een onderzoek naar de invloed van verschillende afmetingen en
positie van de verbinding op de doorbuiging van een balkon.

D. Bourgonje
4460189

Begeleiders:
Dr. Ir. Drs. C.R. Braam
Dr. Ir. P.C.J. Hoogenboom

VOORWOORD

Dit rapport is een afsluiting voor de Bachelor Civiele Techniek aan de Technische Universiteit Delft. Dit rapport moet laten zien dat ik klaar ben voor de Master opleiding. De master die ik wil gaan doen, verklaart gelijk de keuze voor het onderwerp. Tijdens mijn Bachelor merkte ik dat mijn interesse het meest lag bij de constructieve vakken. Ik had dan ook al vrij vroeg door dat ik door wilde gaan met de MSc Structural Engineering.

In dit verslag komen onder andere de Constructie Mechanica vakken veel terug. En natuurlijk de Betonconstructies. Ik heb hierbij meer inzicht gekregen in hoe een constructie in de werkelijkheid geschematiseerd kan worden om er vervolgens berekeningen op toe te kunnen passen. Ook heb ik meer geleerd over de eigenschappen van beton. Hiermee vooral het gedrag van beton over de tijd.

Tenslotte wil ik bij deze graag de begeleiders Dr. Ir. Drs. C.R. Braam en Dr. Ir. P.C.J. Hoogenboom bedanken voor hun ondersteuning tijdens het onderzoek.

SAMENVATTING

Een recent bouwproject kende problemen bij uitkragende galerijplaten, oftewel balkons. Het probleem was dat er een veel grotere zakking van het balkon ontstond dan dat er vooraf berekend was. Dit is vaker een probleem wanneer de vloer wordt uitgevoerd met behulp van een tunnelbekisting. Doel van dit onderzoek was om een model te creëren waarmee de invloed van bepaalde parameters op de zakking kan worden onderzocht en waarmee onderzocht kan worden of de extreme doorbuiging in het betreffende project verklaard kan worden.

Om inzicht te krijgen in de werking van ophangsystemen van balkons is eerst onderzoek gedaan naar het type verbinding, de koudebrug onderbrekende verbinding. Vervolgens is er een studie gedaan naar de vloereigenschappen. Hierbij is onderzocht wat voor invloed het gebruik van een tunnelbekisting heeft op de eigenschappen van de vloer.

Vervolgens is onderzocht welke componenten van de doorbuiging te onderscheiden zijn. Hierbij zijn uiteindelijk 3 componenten tot stand gekomen: doorbuigen van het balkon onder eigen belasting, zakking ten gevolge van rotatie van de vloerrand en de zakking ten gevolge van een rotatie in de verbinding. De zakking ten gevolge van de rotatie van de vloerrand is hier vooral interessant. Deze component is namelijk van veel parameters afhankelijk en zorgt voor het grootste deel van de zakking van het balkon.

Er is vervolgens een model opgesteld om de rotatie van de vloerrand te kunnen bepalen en hiermee de zakking op het balkon. In dit model zijn er verschillende parameters variabel gelaten, hiermee kan de invloed van deze parameters op de zakking bepaald worden. Deze invloeden zijn vervolgens bepaald door initiële afmetingen aan te nemen en vervolgens een procentuele verandering aan te brengen in een enkele parameter. Vervolgens is met behulp van het model hier dan ook de procentuele verandering van de zakking (van deze component) van het balkon voor berekend. Op deze manier valt goed te vergelijken welke parameters van grote invloed zijn op de zakking. Deze informatie zou van toepassing kunnen zijn bij het ontwerpen van een dergelijke balkonconstructie. Hierbij kan bij een eventuele grote zakking geredeneerd worden welke afmetingen het beste aangepast kunnen worden om de zakking te verminderen.

Dit model is toegepast op het genoemde bouwproject dat problemen kende met extreme doorbuigingen. Meer kan helaas niet gezegd worden over dit project maar de afmetingen en de uiteindelijke zakking zijn wel bekend. Dit betekent dat er genoeg informatie is om het model toe te passen.

De BRL stelt eisen aan het toepassen van de verbinding bij balkonconstructies. De beperkingen die de BRL oplegt zijn onderzocht, echter heeft dit niks te maken met de uiteindelijke zakking van het balkon. Uit nader onderzoek bleek dat dit betrekking had op de stijfheidsverhouding tussen de vloer en het balkon. De vloer zal namelijk een hogere stijfheid moeten hebben, anders zal deze belasting afdragen op het balkon in plaats van andersom.

Uit de parameterstudie kon geconcludeerd worden dat vooral de positie van de verbinding en de dikte van de vloer grote invloed hebben op de zakking van het balkon. Het veranderen van deze parameters is dan ook een effectieve manier om de zakking te verminderen. Het toepassen van het model op het beschreven project leverde een grote zakking op. Echter was deze nog steeds enkele centimeters verwijderd van de in werkelijkheid gemeten zakking.

INHOUDSOPGAVE

Voorwoord	1
Samenvatting.....	2
1 Inleiding	5
2 Koudebrug onderbrekende verbinding	6
2.1 Schöck Isokorf type k.....	6
3 Doorbuigingscomponenten.....	7
3.1 verwijderen stempels onder het balkon	8
3.2 verwijderen stempels onder de vloer	9
3.3 Tijdsafhankelijke vervormingen	9
4 De vloerplaat	10
4.1 Sterkteontwikkeling.....	10
4.2 Kruip	11
5 Model vloerrand	12
6 Invloeden op de zakking van het balkon	14
6.1 dikte van de vloer	15
6.2 overspanning tussen de wanden.....	16
6.3 Lengte van de verbinding	17
6.4 Type verbinding.....	18
6.5 positie van de verbinding	19
7 Toepassing van het model.....	20
7.1 Zakking ten gevolge van rotatie vloerrand.....	20
7.2 Zakking onder het eigengewicht van het balkon	20
7.3 Rotatie van de verbinding	21
7.4 Controle.....	21
7.5 Berekening gescheurde elasticiteitsmodulus.....	23
8 Nationale Beoordelingsrichtlijn (BRL)	25
9 Conclusie	26
Referentielijst	27
Figuren.....	28
Tabellen	28
Symbolenlijst	29
Bijlagen	30
Bijlage A: Berekeningen vloereigenschappen	30
Bijlage B: Model voor de stijfheid van de vloerrand	31

Bijlage C: Berekening gescheurde elasticiteitsmodulus	34
---	----

1 INLEIDING

Een recent bouwproject kende problemen bij uitkragende galerijplaten. Deze uitkragende galerijplaten oftewel balkons, bleken uiteindelijk meer door te buigen dan vooraf berekend was. Dit doorbuigen van het balkon is niet gevaarlijk voor de constructie, het is immers geen sterkte probleem. Wel zorgt het voor praktische en visuele problemen. Als de afvoer van het balkon langs de gevel is aangebracht en het balkon naar beneden doorhangt, dan stroomt het water de verkeerde kant op. Bovendien oogt een balkon dat naar beneden hangt onveilig. Om deze reden wordt het balkon van tevoren opgezet om de doorbuiging te compenseren. Maar bij het beschreven project was de berekende opzet dus niet voldoende groot en dit heeft uiteindelijk veel geld gekost.

Deze uitkragende betonconstructie is gebouwd met speciale verbindingen, koudebrug onderbrekende verbindingen, deze verbindingen zorgen voor isolatie om het vormen van koudebruggen tussen binnen en buiten te voorkomen. De balkons zijn prefab en worden lokaal, door middel van de verbindingen, aan de vloer gekoppeld. De vloer wordt ter plaatse gestort als het prefab balkon onderstempeld is. De vloer wordt gestort met behulp van een zogenaamde tunnelbekisting, om snel te kunnen bouwen wordt er sneller ontkist. Het gebruik van de tunnelbekisting resulteert vaker in een doorbuiging die hoger uitkomt dan berekend is. Voor de doorbuiging is het van belang om inzicht te krijgen in de stijfheid van de vloer.

In dit Bachelor eindwerk zal er onderzoek gedaan worden naar de doorbuiging van prefab balkons die zijn verbonden met een ter plaatse gestorte betonnen vloer waarbij gebruik wordt gemaakt van een tunnelbekisting. De verschillende componenten die meewerken aan de doorbuiging aan het einde van het uitkragende balkon zullen onderzocht worden. Er zal onderzocht worden wat deze componenten zijn en welke parameters invloed hebben op deze componenten. Hiermee zal ook geprobeerd worden om de grote doorbuiging bij het beschreven project te verklaren.

De hoofdvraag die hieruit is geformuleerd:

Wat is de invloed van de eigenschappen van de vloer en de positie van de verbinding op de doorbuiging van het balkon?

In dit verslag wordt gekeken naar de verbinding, dit om inzicht te krijgen in hoe de verbinding werkt. Vervolgens zal er onderzocht worden hoe de krachten, bij deze manier van verbinden, overgebracht worden en hoe de vloer hiermee zal vervormen. We onderscheiden hierbij verschillende doorbuigingscomponenten. Deze zullen worden besproken en vervolgens berekend worden. Er zal hierna gekeken worden naar de eigenschappen van de vloer, en de invloed van een tunnelbekisting op de sterkte en stijfheid van de vloerplaat. Met deze kennis zal er een model gemaakt worden die het gedrag van de vloerrand zal beschrijven. Met dit model zullen verschillende parameters variabel gelaten worden, om zo de invloed van de parameters op de doorbuiging van het balkon te onderzoeken. Ten slotte wordt er, aan de hand van de gevonden doorbuigingen, gekeken of er beperkingen aan te geven zijn voor het toepassen van de BRL. Dit resulteert in de volgende deelvragen:

1. *Wat is een koudebrug onderbrekende verbinding?*
2. *Welke doorbuigingscomponenten zijn er te onderscheiden en hoe groot is het aandeel van deze componenten op de totale doorbuiging?*
3. *Wat zijn de eigenschappen van de vloer?*
4. *Hoe kan de stijfheid van de vloerrand worden gemodelleerd?*
5. *Welke parameters hebben, volgens dit model, grote invloed op de totale doorbuiging van het balkon?*
6. *Zijn er beperkingen aan te geven voor het toepassen van de BRL?*

2 KOUDEBRUG ONDERBREKENDE VERBINDING

Dit type verbinding is van toepassing op uitstekende galerijplaten, zoals onder andere balkons en consoles. Een koudebrug onderbrekende verbinding heeft als functie om de vorming van koudebruggen te voorkomen. Gewapend beton is een goede geleider voor warmte, hierdoor kan de warmte naar buiten lekken. Dit kan leiden tot condensvorming aan de binnenkant van het gebouw, wat weer kan resulteren in schimmelvorming. Door middel van de verbinding wordt het uitkragende balkon thermisch geïsoleerd van de binnenkant van het gebouw. De verbinding bestaat uit een stuk isolatie. Deze isolatie heeft vaak een breedte tussen de 80 mm en 120 mm.

In dit onderzoek wordt er gekeken naar het gebruik van prefab balkons, bij prefab balkons wordt de verbinding in de fabriek al aan het balkon gestort. Vervolgens wordt het balkon (met verbinding) op de bouwplaats op de juiste plaats gezet en onderstempeld. Dan wordt ter plaatse de vloer gestort en dus verbonden met het balkon door middel van de verbinding. Vervolgens wordt eerst de stempeling onder het balkon verwijderd, hierdoor zal de verbinding een dwarskracht en moment ondervinden van het uitkragende balkon. Tenslotte wordt de bekisting van de vloer verwijderd. Er is maar een lokale verbinding tussen vloer en balkonplaat. Dit betekent dat ook de positie van de verbinding van invloed zal zijn op de doorbuiging van het balkon.

Er zijn verschillende fabrikanten die de verbindingen produceren. Halfen, Schöck, H-bau en Vilton zijn de bekendste fabrikanten op de Europese markt. In dit onderzoek zullen we ons richten op de koude brug verbinding die Schöck heeft gemaakt als toepassing op balkons. Dit is de Schöck Isokorf type K.

2.1 SCHÖCK ISOKORF TYPE K

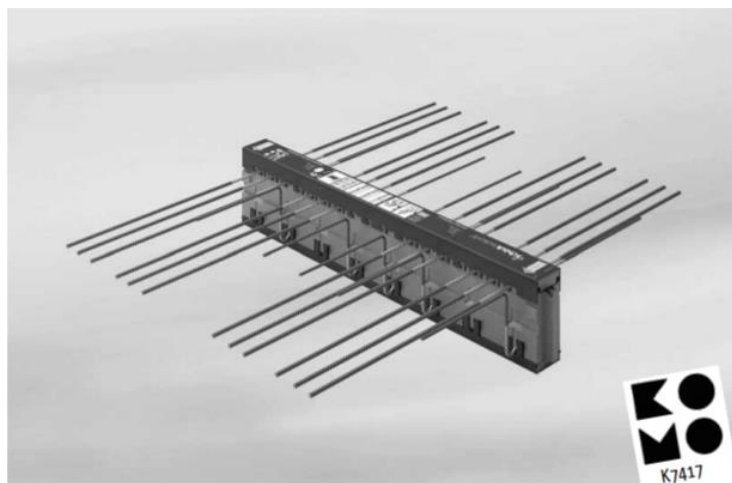
Dit type is door Schöck speciaal ontworpen voor balkons en galerijen. De verbinding bestaat uit 80 mm isolatie om de koudebruggen te voorkomen. Het product is beschikbaar in hoogten van 160-250 mm. De verbindingen zijn leverbaar in lengtes van 250 mm, 500 mm en 1000 mm.

Aangezien dit model van toepassing is op uitkragende constructies, zal de verbinding een dwarskracht en een moment over moeten kunnen dragen.

In figuur 2.1 staat de verbinding weergegeven. De wapening die aan beide kanten van de verbinding te zien is, wordt in het beton gestort om zo de constructiedelen te verbinden.

Het moment zorgt ervoor dat onderin de verbinding een drukspanning ontstaat. Deze drukspanning wordt opgenomen door druknokken. Bovenin zal het moment zorgen voor een trekspanning. Deze trekspanning wordt opgenomen door trekstaven. Om de over te brengen

dwarskracht op te kunnen nemen, wordt er gebruikt gemaakt van dwarskrachtwapening.

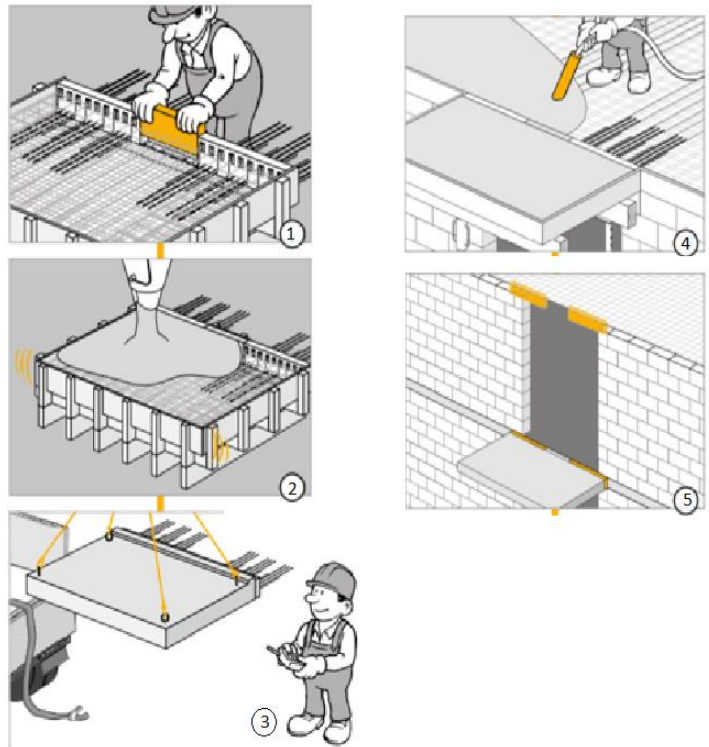


Figuur 2.1 Schöck Isokorf Type K

3 DOORBUIGINGSCOMPONENTEN

Het proces van het ophangen van een balkon gebeurt in verschillende fasen. Deze fasen zijn weergegeven in figuur 3.1 door middel van 5 deelfiguren. In deelfiguur 1 en 2 wordt de verbinding aan het balkon bevestigd en het balkon gestort. Vervolgens wordt het balkon opgehangen in deelfiguur 3. In deelfiguur 4 wordt dan de vloer gestort. Ten slotte wordt eerst de bestempeling van de balkonplaat verwijderd en daarna de bestempeling van de vloer (deelfiguur 5).

Het doorbuigen van het balkon gebeurt ook in fasen en heeft 3 componenten. Met de doorbuiging wordt de zakking van het uiterste punt van het balkon bedoeld. Als het balkon goed geplaatst is en de vloer is gestort, dan worden eerst de stempels onder het balkon verwijderd. Bij het verwijderen van de stempels gaat het balkon vervormen ten gevolge van het eigengewicht en de belasting op het balkon, dit is de eerste component. Vervolgens worden de stempels onder de vloer verwijderd, als gevolg hiervan zal de vloerrand gaan roteren en ook dit resulteert in een doorbuiging van het balkon. Tenslotte treden er tijdsafhankelijke betonvervormingen op.

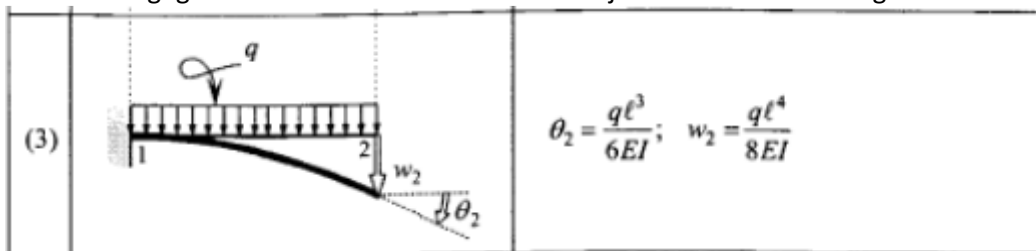


Figuur 3.1 Fasen van de uitvoering

3.1 VERWIJDEREN STEMPELS ONDER HET BALKON

Als de stempels onder het balkon verwijderd worden, zal het balkon echt gaan hangen aan de vloer. De vloer zal nog niet vervormen aangezien de vloer nog onderstempeld is. Het uitkragende deel zelf, oftewel het balkon, zal echter wel gaan vervormen. Dit gebeurt ten gevolge van het eigengewicht van het balkon. De zakking van het uiterste punt kan gemakkelijk berekend worden. Het balkon kan gemodelleerd worden als een uitkragende, ingeklemde ligger belast met een q-last, de q-last representeert het eigengewicht van het balkon. De q-last ten gevolge van het eigengewicht kan berekend worden met de hoogte van de balkonplaat en een breedte kan worden aangenomen. Vervolgens kan met deze hoogte en de aangenomen breedte het traagheidsmoment berekend worden. We beschouwen de situatie waarin alleen het eigengewicht aanwezig is. Aangezien we kijken naar de doorbuiging, oftewel bruikbaarheid grenstoestand, hoeven we volgens NEN-EN 1991 geen belasting factoren toe te passen. Gebruik makende van de E-modulus en het eigengewicht van beton zijn nu alle benodigde parameters bekend om de zakking te berekenen met behulp van het bijbehorende vergeet-me-nietje (figuur 3.1).

Buiten deze vervorming van het balkon zelf zal er nog een component meewerken aan de doorzakking van het balkon. Het balkon komt nu namelijk echt aan de vloer, en dus ook aan de verbinding, te hangen. De verbinding is niet oneindig stijf en zal dus, afhankelijk van de grootte van de belasting, een kleine rotatie ondergaan. Deze gevoeligheid voor rotatie van de verbinding is door de fabrikant van tevoren aangegeven. Een kleine rotatie kan namelijk al resulteren in een grote doorhang.



Figuur 3.2 Vergeet-me-nietje uitkragende ligger

3.2 VERWIJDEREN STEMPELS ONDER DE VLOER

Het uitkragende balkon is, door middel van de koudebrug onderbrekende verbinding, verbonden met de vloer. Dit betekent dat het balkon zijn krachten uitoefent op de rand van de vloer. Zodra de stempels onder de vloer verwijderd worden, zal de vloerrand deze krachten dus op moeten nemen. Door het gewicht van het balkon zal de vloerrand een dwarskracht op moeten nemen. Omdat het balkon uitkraagt heeft de neerwaartse kracht een arm. Dit zorgt ervoor dat er ook een buigend moment uitgeoefend wordt op de rand van de vloer. Door de krachten die het balkon uitoefent op de vloer zal de vloerrand gaan vervormen. Omdat de verbinding tussen het balkon en de vloer niet continu is maar enkel lokaal, is deze vervorming afhankelijk van de positie van de verbinding. Naarmate de verbinding verder van de wand wordt geplaatst, zal de doorbuiging en rotatie van de vloer groter worden. Vooral de rotatie is een probleem, als de rand van de vloer roteert dan doet het balkon dit ook. De rotatie van de vloerrand kan gemakkelijk uitgedrukt worden in de uiteindelijke zakking van het balkon:

$$w = \varphi * l$$

Waarin w de zakking is aan het uiteinde van het balkon, φ de hoekverdraaiing van de vloerrand en l de lengte van het uitkragende deel.

Om de rotatie van de vloerrand te beschrijven zal er in hoofdstuk 5 een model gemaakt worden die het gedrag beschrijft van de vloer. Hiervoor hebben we uiteraard de eigenschappen van de vloer voor nodig, de eigenschappen van de vloer zullen in hoofdstuk 4 worden onderzocht.

3.3 TIJDSAFHANKELIJKE VERVORMINGEN

Naast de elastische vervormingen die zijn besproken in paragraaf 3.2 en 3.1, zal het balkon ook zakken ten gevolge van tijdsafhankelijke vervormingen. Onder constante belasting zal het balkon toch een extra zakking ondergaan ten gevolge van kruip van het beton. De stijfheid van beton zal over de tijd verminderen met een kruipfactor.

De vloer wordt snel ontkist als gevolg van het gebruik maken van een tunnelbekisting, het snel ontkisten zal resulteren in een hogere kruipfactor. In hoofdstuk 4 zal onderzocht wat voor invloed dit heeft op de kruipfactor en zal deze kruipfactor dus berekend worden.

4 DE VLOERPLAAT

Zoals gezegd wordt er in dit onderzoek gericht op het gebruik van een tunnelbekisting bij het plaatsen van de vloerplaat. In de tunnelgietsbouw worden de wanden en de daarop liggende vloer samen gestort. De delen die met deze bekisting gestort worden hebben dus de vorm van een tunnel, hier komt dus de naam tunnelbekisting vandaan.

Belangrijk voordeel van de tunnelgietsbouw is dat hiermee snel gebouwd kan worden. Er wordt hier namelijk gewerkt met een zogenaamde dag cyclus. 's Middags wordt het beton gestort en de volgende ochtend kan alweer worden ontkist. Het beton heeft 16 uur om tot de benodigde druksterkte te komen en wordt dus na deze 16 uur ontkist. Om al zo snel tot de benodigde druksterkte te komen wordt het beton verhard onder een hogere temperatuur. Dit om het verhardingsproces te versnellen.

Bij de tunnelbekisting wordt zoals gezegd de bekisting verwijderd slechts 16 uur na het storten van het beton. Het beton wordt hierbij verhard onder hoge temperatuur, er wordt in dit onderzoek aangenomen dat dit gebeurt bij een temperatuur van 80 °C. Het snel ontkisten en het verharden onder deze temperatuur heeft invloed op zowel de sterkteontwikkeling als de kruip van het beton. In 4.1 wordt de invloed hiervan op de sterkteontwikkeling onderzocht en in 4.2 wordt er een berekening uitgevoerd voor de kruipfactor.

4.1 STERKTEONTWIKKELING

De sterkte die normaal gebruikt wordt in betonberekeningen is de sterkte van het beton na 28 dagen bij een verhardingstemperatuur van 20 °C. In dit geval wordt er echter al ontkist na 16 uur (2/3 dag). Echter gebeurt dit wel onder een hogere temperatuur waardoor een representatieve 'leeftijd' van het beton berekenend moet worden welke wordt aangepast aan de temperatuur. Volgens Braam en Walraven (2015) kan de volgende formule gebruikt worden om deze representatieve 'leeftijd' van het beton te berekenen:

$$t_{0,T} = t_{0,T} \left(\frac{9}{2 + t_{0,T}^{1.2}} + 1 \right)$$

Waarin:

$$t_{0,T} = e^{-\left(\frac{4000}{273+T} - 13,65\right)} \Delta t$$

Met T de temperatuur in °C.

Met een temperatuur van 80 °C resulteert dit in 12 dagen.

Aan de hand van deze aangepaste tijd waarop het beton belast wordt, kan nu aan de hand van formules uit NEN-EN 1992 de sterkte op het moment van belastingen berekend worden. Aan de hand van deze sterkte kan vervolgens de E-modulus bepaald worden, welke nodig is in ons model. De berekening van de sterkte en E-modulus staat in bijlage A.

4.2 KRUIP

De kruipfactor is van veel parameters afhankelijk, ook hier komt de representatieve 'leeftijd' van het beton weer terug. De afmetingen van de te beschouwen balk, in ons geval de strip, hebben invloed op de kruipfactor. Vervolgens moet de relatieve vochtigheid bepaald worden, de relatieve vochtigheid is 50% voor binnen omstandigheden. Ook speelt de sterkte van het beton een rol.

De formule voor de kruipfactor is volgens NEN-EN 1992 :

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \beta_{cc}(t, t_0)$$

Hierin is $\beta_{cc}(t, t_0)$ tijdsafhankelijk, omdat we het geval bekijken voor $t = \infty$ kan deze aangenomen worden als 1. φ_0 bestaat uit 3 componenten:

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t_0)$$

waarin φ_{RH} de factor is voor de relatieve vochtigheid, $\beta(f_{cm})$ is de factor voor het effect van de betonsterkte en $\beta(t_0)$ is de factor voor de leeftijd van het beton op het moment van belasten. De berekening voor de kruipfactor staat in Bijlage A. Uiteindelijk wordt een kruipfactor berekend van 1,98.

5 MODEL VLOERRAND

Door de belasting die het balkon uitoefent op de vloer zal de vloer gaan vervormen. De vloerrand zal roteren en zakken, alleen de rotatie is van belang voor de doorhang van het balkon. Als de vloerrand roteert, dan doet de balkonplaat dit namelijk ook, he langer de uitkraging is des te meer zakking deze rotatie uiteindelijk veroorzaakt.

De vloer wordt geschematiseerd als een half oneindig lange plaat die aan twee kanten door de wanden is ingeklemd. De vloerplaat is slechts lokaal verbonden met de balkonplaat, alleen de rotatie op die positie is van belang aangezien dit de rotatie is die het balkon ook ondervindt. We bekijken daarom een strip in y-richting ter plaatse van de verbinding, deze strip is gearceerd in figuur 5.1. De breedte van deze strip is gelijk aan de breedte van de verbinding.

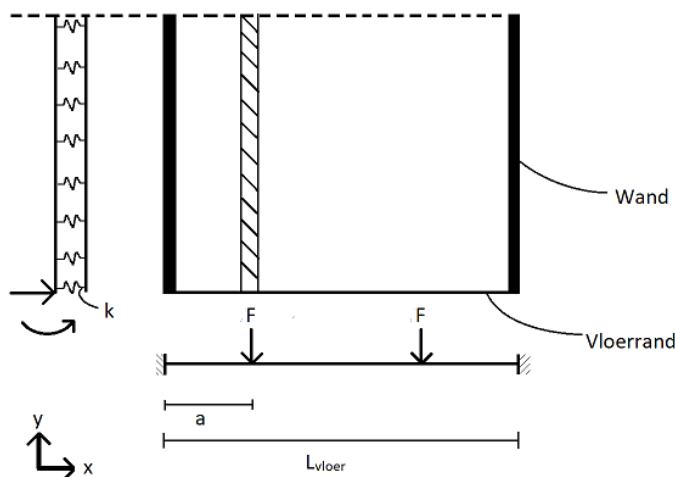
De strip wordt geschematiseerd als een half oneindige balk. Aan het uiteinde van deze balk, de vloerrand, werkt een moment en een dwarskracht ten gevolge van het balkon dat daar hangt.

In het model heeft de balk een constante verende ondersteuning. De k-waarde van deze verende ondersteuning volgt uit schematisering van de vloerrand in x-richting. Onderin figuur 5.1 staat de geschematiseerde balk aangegeven. Hierop werkt de dwarskracht van de balkonplaat (F) op twee punten, namelijk beide verbindingen. Om de k-waarde te bepalen moet de zakking ter plaatse van de verbinding (ten gevolge van beide puntlasten) worden uitgedrukt in de puntlasten. Met behulp van vervormingsenergie, de wet van Castigliano, kan deze zakking bepaald worden. Hierbij gebruikt men de puntlast ter plaatse van de te bepalen zakking:

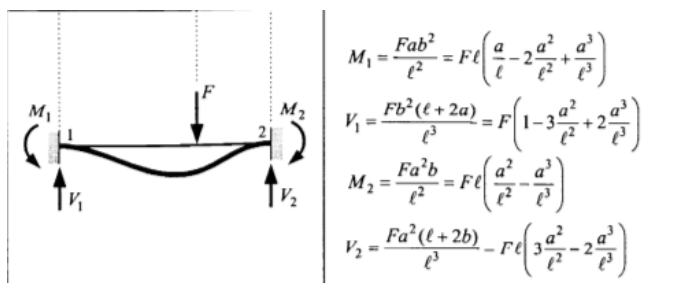
$$w = \int_0^l \frac{M(x)}{EI} * \frac{dM(x)}{dF} dx$$

Hierin is $M(x)$ het verloop van de momentenlijn over de lengte van de balk. Met behulp van het vergeet-me-nietje uit figuur 5.2 kunnen de steunpunt momenten bepaald worden.

$\frac{dM(x)}{dF}$ is het verloop van de momentenlijn gedifferentieerd naar de puntlast ter plaatse van de te bepalen zakking. Omdat de momentenlijn enkel afhangt van de twee identieke puntlasten, halveren we in $\frac{dM(x)}{dF}$ de $M(x)$. Anders zou het verloop van de momentenlijn eerst uitgedrukt moeten worden in twee afzonderlijke puntlasten om vervolgens gedifferentieerd te worden naar 1 van de twee puntlasten. Dit maakt de integraal alleen een stuk langer. Aangezien de puntlasten identiek zijn, hebben ze beiden dezelfde invloed op de



Figuur 5.1 Schematisering van de vloerplaat



Figuur 5.2 Vergeet-me-nietje dubbel ingeklemde ligger

vervolgens gedifferentieerd te worden naar 1 van de twee puntlasten. Dit maakt de integraal alleen een stuk langer. Aangezien de puntlasten identiek zijn, hebben ze beiden dezelfde invloed op de

momentenlijn. Hieruit volgt dat voor $\frac{dM(x)}{dF}$, de $M(x)$ simpelweg gehalveerd kan worden. De uitwerking hiervan staat in bijlage B. Dit resulteert in de volgende formules voor de zakking en de veerstijfheid:

$$\left. \begin{aligned} w &= \frac{F}{2EI} \left(-\frac{a^4}{l} + \frac{2}{3}a^3 \right) \\ k &= \frac{F}{w} \end{aligned} \right\} k = \frac{2EI}{\left(-\frac{a^4}{l} + \frac{2}{3}a^3 \right)}$$

Deze formule is van toepassing mits er twee verbindingen worden toegepast. Hierin is a de positie van de verbinding ten opzichte van de wand. Deze is variabel gelaten zodat dit in ons model gemakkelijk aangepast kan worden, hiermee kan de invloed van de positie van de verbinding onderzocht worden.

Nu de k -waarde bekend is, wordt er alleen nog gekeken naar de geschematiseerde balk in y -richting. De half oneindige balk met de verende ondersteuning kan beschreven worden met een differentiaalvergelijking:

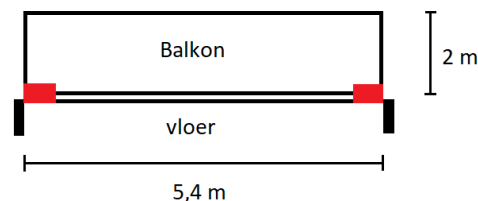
$$EI \frac{d^4 w}{dy^4} + kw = q = 0$$

De enige vervorming die we uiteindelijk willen bepalen van deze balk, is de hoekverdraaiing aan het einde van de balk (oftewel de vloerrand). De differentiaalvergelijking kan opgelost worden met behulp van 3 randvoorwaarden: het moment en de dwarskracht aan het uiteinde van de balk ($y=0$), dit kan berekend worden met de gegevens van het balkon. De laatste randvoorwaarde is dat de zakking op $y =$ oneindig 0 is. In bijlage B is de differentiaalvergelijking uitgewerkt om zo een formule te krijgen voor de hoekverdraaiing van de vloer.

6 INVLOEDEN OP DE ZAKKING VAN HET BALKON

In het model uit hoofdstuk 5 zijn verschillende parameters variabel gelaten, hierdoor kan nu gemakkelijk de invloed van deze parameters op de zakking van het balkon bepaald worden. In dit hoofdstuk bekijken we enkel het effect van de parameters op de rotatie van de vloerrand en de zakking die daaruit ontstaat. De component van het doorbuigen van het balkon onder het eigengewicht wordt hierin niet meegenomen. Deze component is namelijk gelijk voor elke situatie die we in dit hoofdstuk beschouwen. De zakking ten gevolge van de rotatie van de verbinding zelf, wordt berekend in paragraaf 6.4. In de andere paragrafen is deze zakking niet meegenomen maar wordt enkel de zakking ten gevolge van rotatie van de vloerrand bekeken.

De afmetingen van het balkon die initieel worden aangenomen staan weergegeven in figuur 6.1. We nemen de dikte van de vloer evenals de dikte van de balkonplaat initieel aan als 240 mm en gebruiken C20/25. Positie van de verbinding nemen we initieel aan als grenzend aan de wand. De positie van de verbinding ten opzichte van de wand is in ons model de waarde a genoemd, a is initieel dus gedefinieerd als de halve breedte van de verbinding. De hoogte van de verbinding is gelijk aan de dikte van het balkon en dus 240 mm, de breedte van de verbinding hangt af van het moment dat op de verbinding staat en zal dus berekend moeten worden:



Figuur 6.1 Initieel aangenomen afmetingen van het balkon

$$M_{\text{balkon}} = V_{\text{balkon}} * \frac{1}{2} l_{\text{balkon}}$$

$$V_{\text{balkon}} = \frac{l * b}{n} * (\rho * d)$$

met $n = 2$ en $\rho = 24,5 \text{ kN/m}^3$ (zie bijlage B).

Dit resulteert in een moment van 31,8 kNm per verbinding. Uit tabel 6 volgt dat de lengte van de verbinding 1 meter is, indien we het type K40E-CV30-V8 toepassen. Tabel 6 is afkomstig uit de brochure van Schöck voor de Isokorf type K. Volgens Schöck wordt de codering van het type verbinding beschreven als:

{Naam type}{lastklasse buigend moment}-{CV}[dekking op bovenstaaf in mm]-{V}{lastklasse dwarskracht}.

Schöck Isokorf® type	K20E-CV30-V8			K40E-CV30-V8				K60E-CV30-V8			
Elementlengte (mm)	1000			1000				1000			
Bovenstaven (As,t)	8 Ø 8			8 Ø 10				8 Ø 12			
Drukelementen	8 HTE20			8 HTE20				12 HTE30			
Dwarskrachtstaven (As,q)	8 Ø 8			8 Ø 8				8 Ø 8			
Typeomschrijving	V8			V8				V8			
Elementhoogte H (mm)	M _{Rd,C20/25} (kN/m)	V _{Rd,C20/25} (kN/m)	C (kN/rad)	M _{Rd,C20/25} (kN/m)	M _{Rd,C25/30} (kN/m)	V _{Rd,C20/25} (kN/m)	C (kN/rad)	M _{Rd,C20/25} (kN/m)	M _{Rd,C25/30} (kN/m)	V _{Rd,C20/25} (kN/rad)	C (kN/rad)
160	17,0	99,5	1846	22,0	23,6	99,5	2069	34,1	34,1	99,5	2565
170	18,8	99,5	2279	23,7	26,1	99,5	2559	38,1	38,1	99,5	3221
180	20,6	99,5	2758	25,3	28,6	99,5	3103	42,0	42,0	99,5	3951
190	22,4	99,5	3282	27,0	31,1	99,5	3698	45,9	45,9	99,5	4755
200	24,2	99,5	3852	28,7	33,5	99,5	4346	49,6	49,8	99,5	5634
210	26,0	99,5	4467	30,3	35,6	99,5	5046	53,1	53,7	99,5	6587
220	27,7	99,5	5128	32,0	37,6	99,5	5798	56,6	57,6	99,5	7615
230	29,5	99,5	5835	33,7	39,7	99,5	6602	60,1	61,5	99,5	8717
240	31,3	99,5	6587	35,3	41,7	99,5	7459	63,6	65,4	99,5	9894
250	33,1	99,5	7385	37,0	43,8	99,5	8367	67,1	69,3	99,5	11145
260	34,8	99,5	8228	38,7	45,8	99,5	9328	70,6	73,1	99,5	12470
270	36,6	99,5	9117	40,3	47,9	99,5	10342	74,1	77,0	99,5	13871
280	38,4	99,5	10051	42,0	49,9	99,5	11407	77,6	80,9	99,5	15345
290	40,1	99,5	11031	43,7	51,9	99,5	12525	81,1	84,7	99,5	16894
300	41,9	99,5	12057	45,3	54,0	99,5	13695	84,6	88,6	99,5	18518

tabel 6: Sterkte eigenschappen van verschillende typen verbindingen

Nu zijn alle gegevens bekend die nodig zijn om het model toe te passen. Dit resulteert in een zakking van het balkon van 4,55 mm.

6.1 DIKTE VAN DE VLOER

Normaal gesproken wordt de dikte van de vloer veranderd als gevolg van een verandering in de overspanning. In dit geval wordt enkel gekeken naar de invloed van een verandering in de dikte van de vloer, dus zal de overspanning constant blijven. De dikte van de vloer komt in het model terug in het traagheidsmoment van de balk en heeft ook een minimale invloed op de kruipfactor, de invloed op de kruipfactor kan worden verwaarloosd.

Een kleine verandering in dikte van de vloer kan al resulteren in een relatief grote toename of afname van de zakking. De dikte van de vloer komt in ons traagheidsmoment namelijk terug tot de derde macht. Een kleine toename van de vloerdikte zorgt dus al voor een stijvere balk.

Zoals volgt uit de berekening van ons model in bijlage B, kan de hoekverdraaiing van de vloerrand, welke recht evenredig is met de zakking van het balkon, beschreven worden als:

$$\varphi = \alpha(-C_3 + C_4) \quad ; \quad \alpha^4 = \frac{k}{4EI} \quad ; \quad \text{waarin } k = \frac{2EI}{(-\frac{a^4}{l} + \frac{2}{3}a^3)}$$

$$C_4 = -\frac{Mbalkon}{2EI\alpha^2}$$

$$C_3 = \frac{Vbalkon}{2EI\alpha^3} - C_4$$

In zowel α , C_3 als C_4 komt het traagheidsmoment terug. Als we de veerstijfheid in de formule voor α invullen zien we dat zowel in de teller als in de noemer het traagheidsmoment staat. Dit betekent dat we deze weg kunnen delen en dat α dus onafhankelijk is van de dikte van de vloer. Dit betekent dat de dikte enkel nog terugkomt in het traagheidsmoment in de twee constanten. Als we nu de formule voor de hoekverdraaiing uitwerken volgt:

$$\varphi = -\frac{2Mbalkon * \alpha + Vbalkon}{2EI\alpha^2}$$

De vloerdikte komt hier zoals gezegd enkel terug in het traagheidsmoment. Indien de vloerdikte met een factor A groter wordt, wordt het traagheidsmoment met een factor A^3 groter. Uit bovenstaande formule volgt dat de hoekverdraaiing van de vloerrand dan juist met een factor A^3 zal afnemen. Aangezien de hoekverdraaiing recht evenredig is met de zakking van het balkon, zal ook de zakking van het balkon dan dus afnemen met deze factor.

In tabel 6.1 staan voor verschillende vloerdiktes de bijbehorende zakkingen van het balkon. Deze verschillen minimaal met de verwachte zakking volgens de bovenstaande factor. Dit komt omdat de vloerdikte zoals gezegd ook terugkomt in de kruipfactor. Echter is deze invloed op de kruipfactor zeer klein en hebben we deze niet meegenomen in de berekende factor.

Uit de tabel volgt dat een toename van de vloerdikte van slechts 5% al resulteert in een afname van de zakking van maar liefst 14 %.

Dikte vloer [mm]	Toename vloerdikte [%]	Zakking van het balkon [mm]	Afname zakking [%]	Verwachte zakking [mm]
240	0	4,55	0	-
252	5	3,93	14	3,93
264	10	3,41	25	3,42
288	20	2,63	42	2,63
312	30	2,06	55	2,07

Tabel 6.1 Zakking van het balkon bij verschillende vloerdiktes

6.2 OVERSPANNING TUSSEN DE WANDEN

Als men kiest voor een grotere overspanning tussen de wanden, zal dit normaal gesproken gepaard gaan met een dikkere vloer. Om het effect van de lengte van de overspanning te bekijken, zullen we hier enkel de grootte van de overspanning veranderen ten opzichte van de initiële afmetingen. We zien de grootte van de overspanning twee keer terugkomen in ons model. Bij een grotere overspanning zal ook het balkon groter worden, hiermee nemen het moment en de dwarskracht op de gemodelleerde balk toe. Ook de veerstijfheid is afhankelijk van de overspanning, een grotere overspanning resulteert in een lagere veerstijfheid.

Bij het onderzoeken van de invloed van de dikte van de vloer hebben we de uitdrukking voor de hoekverdraaiing uitgewerkt tot:

$$\varphi = -\frac{2Mbalkon * \alpha + Vbalkon}{2EI\alpha^2}$$

Hierin zien we de overspanningslengte terugkomen in Mbalkon, Vbalkon en in α (omdat deze afhankelijk is van de veerstijfheid). Mbalkon en Vbalkon zullen recht evenredig toenemen bij een toename van de overspanningslengte. Dit geldt echter niet voor α . Voor α geldt:

$$k = \frac{2EI}{(-\frac{\alpha^4}{l} + \frac{2}{3}\alpha^3)} \left. \begin{array}{l} \alpha^4 = \frac{k}{4EI} \\ \alpha^4 = \frac{1}{2(-\frac{\alpha^4}{l} + \frac{2}{3}\alpha^3)} \end{array} \right\}$$

Met l de overspanningslengte en a de positie van de verbinding ten opzichte van de wand.

Indien de overspanningslengte toeneemt, zal α juist afnemen. Echter zal deze afname minimaal zijn. Als we dit verwaarlozen zal de zakking van het balkon dus recht evenredig zijn met de overspanningslengte. Dit betekent dat indien de overspanningslengte toeneemt met een factor A, de zakking van het balkon dit ook doet. In tabel 6.2 kan men zien dat de invloed van α inderdaad minimaal is en dat de zakking bijna recht evenredig is met de overspanningslengte. Hieruit kan men ook concluderen dat de overspanningslengte een stuk minder invloed heeft op de zakking dan de vloerdikte. Een toename van de overspanningslengte van 5 % resulteert in een toename van de zakking van 5 %. Waar een toename van de vloerdikte van 5 % resulteerde in een afname van de zakking van maar liefst 14 %.

Overspanning [mm]	Toename overspanning [%]	Zakking van het balkon [mm]	Toename zakking [%]	Verwachtte zakking [mm]
5400	0	4,55	0	
5670	5	4,79	5	4,78
5940	10	5,03	11	5,01
6480	20	5,50	21	5,46
7020	30	5,98	31	5,92

Tabel 6.2 Zakking van het balkon bij verschillende overspanning

6.3 LENGTE VAN DE VERBINDING

Uit de tabel met de sterkte eigenschappen van de verschillende typen verbindingen (tabel 6) volgde dat een verbinding van het type K40E-CV30-V8 met een lengte van 1 m toegepast kon worden. Echter kan men er ook voor kiezen om de sterkere verbinding toe te passen (K60E-CV30-V8), in dat geval zou een verbinding lengte van 0,5 meter al voldoen. Ook kan men er voor kiezen om juist de minder sterke verbinding te gebruiken (K20E-CV30-V8), in dit geval zou een verbinding lengte van 1,5 meter voldoende zijn.

We onderzoeken nu de gevolgen van het veranderen van de lengte van de verbinding, waarbij we de verbinding grenzend aan de wand toe blijven passen.

Het vergroten van de verbinding lengte heeft twee tegenstrijdige gevolgen. Het traagheidsmoment van de strip in ons model wordt groter wat zal resulteren in een afname van de zakking ten opzichte van de initiële afmetingen. Maar daar tegenover staat dat de positie van het hart van de verbinding ten opzichte van de wand toeneemt, wat juist weer zorgt voor een toename van de zakking van het balkon. Voor het verkleinen van de verbinding lengte geldt dit uiteraard juist andersom.

Lengte van de verbinding [mm]	Zakking [mm]	Verhouding met initiële zakking
500	5,02 mm	1,10
1000	4,55 mm	1
1500	4,33 mm	0,95

Tabel 6.3 Zakking van het balkon bij verschillende lengtes van de verbinding

Uit tabel 6.3 volgt dat indien de lengte van de verbinding met 50 % korter wordt gemaakt, de zakking toeneemt met 10 %. Als de lengte van de verbinding met 50 % wordt vergroot, neemt de zakking af met 5 %.

6.4 TYPE VERBINDING

In paragraaf 6.3 is besproken dat, indien er wordt gekozen voor een ander type verbinding, de lengte aangepast kan worden wat weer invloed heeft op de zakking van het balkon. Dit is echter enkel de zakking van het balkon ten gevolge van het roteren van de vloerrand. Tot nu toe is in dit onderzoek de verbinding als oneindig stijf behandeld, in werkelijkheid zal onder de belasting van de balkonplaat ook de verbinding roteren. De verbinding kan hierin geschematiseerd worden als een rotatieveer, door het moment dat de balkonplaat op de verbinding uitoefent zal het balkon dus een extra zakking ondergaan ten gevolge van de rotatie. De C-waarde voor de geschematiseerde rotatieveer is door Schöck vermeld per type verbinding. Deze C-waarde staat vermeld in tabel 6.

De invloed van het type verbinding wordt weer onderzocht voor de initiële afmetingen en enkel de lengte van de verbinding wordt aangepast ten gevolge van het toepassen van een ander type verbinding. Het buigend moment op de vloerrand door de balkonplaat is gelijk aan 31,8 kNm per verbinding.

De rotatie van de balkonplaat kan volgens Schöck vervolgens berekend worden met:

$$\varphi = \frac{M_{balkon}}{C}$$

Waarin M_{balkon} het moment ten gevolge van het balkon is in kNm/m en C de rotatieveer constante in kN/rad.

Uiteraard heeft de sterkere verbinding een hogere rotatieveer constante, echter wordt het moment per strekkende meter bij de sterkere verbinding daarentegen ook groter aangezien er dan een kleinere lengte van de verbinding wordt toegepast. De zakkingen per type verbinding staan in tabel 6.4. Dit zijn echter de zakkingen ten gevolge van enkel de rotatie van de verbinding zelf, hierbij zit de rotatie van de vloerrand niet inbegrepen.

Verbinding	Lengte (m)	C (kN/rad)	M_{balkon} (kNm/m)	φ (rad)	Zakking balkon (mm)
K20E-CV30-V8	1,5	6587	21,168	0,0032	6,43
K40E-CV30-V8	1	7459	31,752	0,0043	8,51
K60E-CV30-V8	0,5	9894	63,504	0,0064	12,84

Tabel 6.4 Zakking van het balkon bij verschillende typen verbinding

6.5 POSITIE VAN DE VERBINDING

In het model dat de stijfheid van de vloerrand beschrijft, is de positie van de verbinding ten opzichte van de wand variabel gelaten. Dit geeft de mogelijkheid om deze afstand gemakkelijk in het model aan te passen. Hiermee kan de invloed van deze afstand goed onderzocht worden.

Deze afstand komt in het model terug in de veerstijfheid. In de uiteindelijke formule die is afgeleid voor de zakking, komt deze terug in de α :

$$\left. \begin{aligned} \alpha^4 &= \frac{k}{4EI} \\ k &= \frac{2EI}{\left(-\frac{\alpha^4}{l} + \frac{2}{3}\alpha^3\right)} \end{aligned} \right\} \alpha^4 = \frac{1}{2\left(-\frac{\alpha^4}{l} + \frac{2}{3}\alpha^3\right)}$$

Hieruit blijkt dat α zal afnemen indien de verbinding verder van de wand geplaatst wordt. Dit resulteert vervolgens in een grotere zakking. Dit is logisch aangezien hoe verder de verbinding van de wand geplaatst wordt, te meer rotatie (en zakking) van de vloerrand wordt veroorzaakt.

In tabel 6.5 zien we dat de invloed van de positie zeer groot is op de doorbuiging van het balkon. Een verplaatsing van de verbinding over een afstand van 5 % van de overspanningslengte veroorzaakt in dit geval een toename van maar liefst 46 % van de zakking van deze component

Positie t.o.v. de wand [mm]	Verplaatsing verbinding t.o.v. initiële situatie uitgedrukt in l	Zakking [mm]	Toename zakking [%]
500	0	4,55 mm	0
770	$\frac{1}{20}l$	6,66 mm	46 %
1040	$\frac{1}{10}l$	8,66 mm	90%
1580	$\frac{1}{5}l$	12,26 mm	170 %

Tabel 6.5 Zakking van het balkon bij verschillende posities van de verbinding

7 TOEPASSING VAN HET MODEL

In dit hoofdstuk zal er een berekening met behulp van het model uitgevoerd worden. Om te proberen de extreme doorbuiging van het beschreven project te verklaren zal het model toe worden gepast op dit project. Dit project is in 2016 al onderzocht in een Bachelor eindwerk van T.J.B. Boelders. Boelders onderzocht wat de indrukking van de druknokken in het beton voor invloed heeft op de zakking. Voor dit betreffende project kwam deze zakking uit op 2,15 mm. In dit verslag is deze component niet meegenomen maar ligt de focus op andere componenten. We nemen de 2,15 mm die Boelders berekend heeft mee in de opsomming van de zakkingscomponenten.

7.1 ZAKKING TEN GEVOLGE VAN ROTATIE VLOERRAND

In hoofdstuk 5 is een model gemaakt die de zakking ten gevolge van rotatie van de vloerrand berekent. De benodigde gegevens van dit project voor het model zijn als volgt:

- | | |
|--------------------------------------|-----------|
| • Dikte vloer: | 240 mm |
| • Dikte balkonplaat: | 260 mm |
| • Overspanning tussen de wanden: | 7500 mm |
| • Lengte verbinding: | 2000 mm |
| • Positie verbinding t.o.v. de wand: | 1000 mm |
| • Betonsterkteklasse: | C20/25 |
| • Lengte van de uitkraging: | 2420 mm * |

*De balkonplaat heeft een uitkraging van 2340 mm, er wordt een verbinding toegepast van 80 mm waardoor de uitkraging t.o.v. de vloerrand 2420 mm is. Voor de component van de zakking van het balkon onder eigengewicht zal de lengte van de uitkraging 2340 mm bedragen.

Het toepassen van het model levert voor deze component een zakking op van 10,85 mm.

7.2 ZAKKING ONDER HET EIGENGEWICHT VAN HET BALKON

In paragraaf 3.1 is beschreven hoe deze component berekend kan worden. Dit kan gemakkelijk gedaan worden met behulp van het vergeet-me-nietje. We gaan er vanuit dat de galerijplaat ook een betonsterkteklasse heeft van C20/25. De lengte van de uitkraging is in dit geval 2340 mm. De breedte van de balk die we aannemen is niet relevant. In het vergeet me nietje komt deze breedte namelijk terug in zowel het traagheidsmoment als in het berekenen van het eigengewicht (q):

$$w = \frac{ql^4}{8EI}$$

We zien uit bovenstaande formule dat we deze dus tegen elkaar wegvallen.

Deze zakkingscomponent resulteert in een zakking van het balkon van 0,54 mm.

7.3 ROTATIE VAN DE VERBINDING

Met deze afmetingen van de galerijplaat, moeten de verbindingen een moment overbrengen van:

$$M = \frac{1}{2} l^2 * b * \rho * d = 130,8 \text{ kNm}$$

Met l de lengte van de uitkraging van het balkon zelf, b de breedte van de balkonplaat (gelijk aan lengte van de overspanning), ρ het eigengewicht van beton en d de dikte van de balkonplaat.

Per verbinding zal er dus een moment van 65,4 kNm overgebracht moeten kunnen worden. De breedte van de verbinding is 2 m, dit resulteert in een moment van 32,7 kNm/m per verbinding. Voor de capaciteit wordt echter gerekend in de ultimate limit state (ULS). Dit betekent dat er een factor 1,35 op moet. Dit levert een moment op van 44,145 kNm/m. We gaan ervanuit dat de hoogte van de verbinding gelijk is aan de dikte van de vloer (240 mm). Uit tabel 6 volgt dat we dan het type K60E-CV30-V8 nodig hebben. Uit deze tabel volgt ook dat de C-waarde voor deze verbinding 7459 bedraagt. Voor het berekenen van de zakking moet het moment worden toegepast zonder belastingfactoren. Dit is namelijk weer een bruikbaarheidsgrenstoestand. Met onderstaande formule kunnen we de rotatie van de verbinding bepalen:

$$\varphi = \frac{M_{balkon}}{C} = \frac{32,7}{9894} = 0,0033 \text{ rad}$$

Deze hoekverdraaiing moeten we vervolgens vermenigvuldigen met de lengte van de uitkraging van het balkon (2340 mm). Dit resulteert dan in een zakking van 7,722 mm.

7.4 CONTROLE

Als we alle doorbuigingscomponenten optellen, komen we uit op een totale zakking van 21,26 mm. Echter hebben we de berekeningen toegepast die juist zijn indien het beton niet scheurt, dit moet dus nog gecontroleerd worden.

Het scheurmoment kan bepaald worden met onderstaande formule uit de NEN-EN 1992 norm.

$$M_{cr} = f_{ctm} W_t$$

Met W_t het weerstandsmoment met betrekking tot de meest getrokken vezel.

$$W_t = \frac{1}{6} b h^2$$

We bekijken de strip voor de vloerrand. Deze strip heeft een breedte van 2 meter (lengte van de verbinding) en een hoogte van 240 mm. Dit resulteert in een W_t van 0,0192 m³. Voor f_{ctm} gebruiken we de volgende formule:

$$f_{ctm} = 0,3 * f_{ck}^{\frac{2}{3}}$$

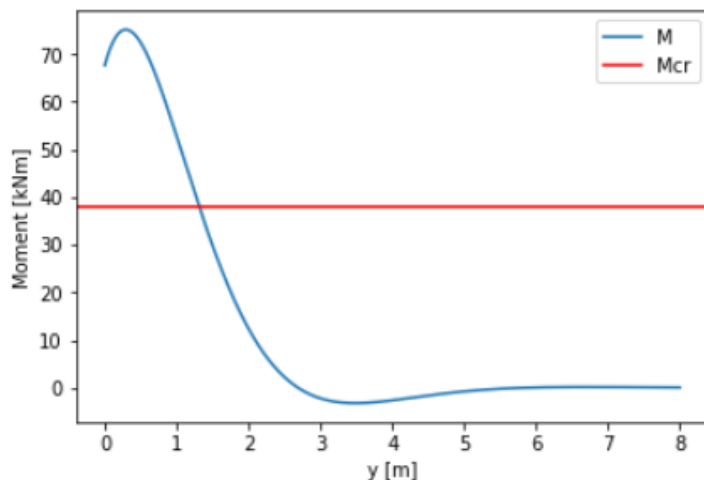
Echter wordt er in ons geval eerder ontkist, we gebruiken nu dezelfde factor die we hebben gebruikt voor f_{cm} :

$$\beta_{cc}(t) = \exp\left(s \left(1 - \left(\frac{28}{t_0}\right)^{\frac{1}{2}}\right)\right) = 0,90$$

Dit levert een f_{ctm} op van $1,99 \text{ N/mm}^2$. Invullen levert een scheurmoment op van $M_{cr} = 38,2 \text{ kNm}$. Met behulp van de differentiaalvergelijkingen kan de momentenlijn over de strip geplot worden. De formule voor de momentenlijn is berekend in bijlage B en is als volgt:

$$M(y) = -EI [\alpha^2 e^{-\alpha y} (-2C_4 \cos \alpha y + 2C_3 \sin \alpha y)]$$

In figuur 7.1 staat deze plot weergegeven over een lengte van 8 meter. Ook staat hier een horizontale lijn met als waarde het scheurmoment, hiermee kan bekeken worden over welk deel van de strip het scheurmoment overschreden wordt. Uit de figuur kan geconcludeerd worden dat er scheuren ontstaan over de eerste 1,3 meter van de strip. Echter is er hierbij geen rekening mee gehouden dat het in werkelijkheid geen balk betreft maar een plaat. Dit duidt erop dat de belasting verspreid wordt en deze afstand kleiner zou uitvallen.



Figuur 7.1 python plot momentenlijn van de strip

Om te kunnen bepalen of de balk nu als geheel gescheurd kan worden aangenomen, zal er naar het zakkingsprofiel van de balk gekeken moeten worden. Het zakkingsprofiel staat beschreven in bijlage B en hieruit volgt de volgende formule:

$$w(y) = e^{-\alpha y} [C_3 \cos \alpha y + C_4 \sin \alpha y]$$

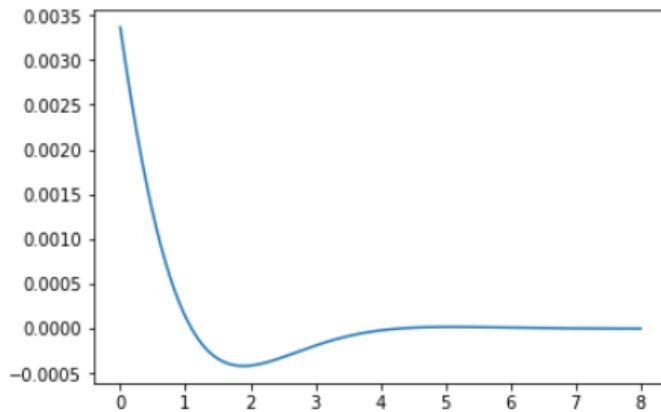
Bij het vak CTB2300 is geleerd hoe aan zo'n bewegingsvergelijking gerekend kan worden. Het enige verschil is dat bij CTB2300 vaak een beweging over variabele tijd werd beschreven, in dit geval wordt er een beweging over een variabele afstand beschreven. Voor de exponentiele functie is bekend dat de hoekfrequentie ω in dit geval gelijk is aan α . Vervolgens kan de periode van 1 golflengte worden berekend met:

$$T = \frac{2\pi}{\omega}$$

Deze periode is in meter lengte van de balk. Zoals gezegd is dit dus niet de tijd.

Een verschil van een halve golflengte zorgt al voor een verhouding van $e^{-\pi} = 0,0432$ met de volgende waarde. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de beweging dus zeer snel uit dempt. Echter zijn wij geïnteresseerd wat er van de beweging over is na 1,3 meter, aangezien over deze afstand het scheurmoment overschreden wordt. Uit de formules kan bepaald worden dat dat 70 % van de beweging is gedempt na 1,3 meter. Dit kan ook grafisch bekeken worden, in figuur 7.2 staat de zakkingslijn geplot tegen de afstand over de balk. Hierin valt op dat de beweging inderdaad aanzienlijk snel gedempt wordt. Hieruit kan de conclusie worden getrokken dat de eigenschappen van de balk

vooral worden bepaald over de eerste meter(s). Er wordt aangenomen dat de balk als volledig gescheurd beschouwd kan worden.



Figuur 7.2 python plot zakkingslijn strip

7.5 BEREKENING GESCHEURDE ELASTICITEITSMODULUS

Om de gescheurde elasticiteitsmodulus te berekenen zal er eerst een wapeningspercentage bekend moeten zijn. Dit wapeningspercentage kan berekend worden met een ULS berekening. Hierbij wordt de momentcapaciteit van de balk gelijk gesteld aan de momentcapaciteit van de verbinding. Met het type verbinding dat we gebruiken volgt uit tabel 6 dat de momentcapaciteit 127,2 kNm wordt. Met behulp van een ULS doorsnede berekening kan nu de hoogte van de betondrukzone bepaald worden. Hiermee kan vervolgens het wapeningspercentage berekend worden. Deze berekening staat in bijlage C. Het wapeningspercentage komt uit op 0,35 %.

Het vervolg van de berekening zal zijn in de bruikbaarheid grenstoestand (BGT). Een indicatie van het BGT moment is: $\frac{\text{moment (ULS)}}{1,3}$. Deze verhouding volgt uit dat de belastingfactor op G = 1,2 en op Q = 1,5. Bij een betonconstructie overheerst echter vaak het eigengewicht. Hieruit komt 1,3 op een goede verhouding ULS/BGT.

Met de volgende formule kan er voor de BGT een hoogte van de betondrukzone bepaald worden:

$$\frac{x}{d} = -\alpha E \rho l + \sqrt{(\alpha E \rho l)^2 + 2 \alpha E \rho l}$$

Met $\alpha_E = E_s/E_c$ en ρ_l de wapeningsverhouding. Hierin wordt de E_c gebruikt die al is gereduceerd door de kruipfactor.

Vervolgens moeten er twee punten in het moment-krommingdiagram bepaald worden: Het moment dat de wapening begint met vloeien en het scheurmoment. Voor de eerst zal weer een doorsnede berekening gemaakt moeten worden, hierbij moet gecontroleerd worden of de maximale betonspanning niet overschreden wordt. Deze berekening staat in bijlage C. Het scheurmoment is al bepaald met de volgende formule: $M_{cr} = f_{ctm} W_t$. De bijbehorende kromming kan bepaald worden door dit moment te delen door $E_c I$, met E_c de elasticiteitsmodulus van het beton gereduceerd door de kruipfactor. Volgens NEN 6720, welke inmiddels is verlopen, kan voor het BGT moment de bijbehorende kromming bepaald worden door een lijn te trekken door de twee berekende punten uit

het moment-krommingsdiagram. Met verhoudingen kan nu de kromming bij het BGT moment worden bepaald, vervolgens kan de gescheurde elasticiteitsmodulus berekend worden volgens:

$$E = \frac{M}{\kappa * I}$$

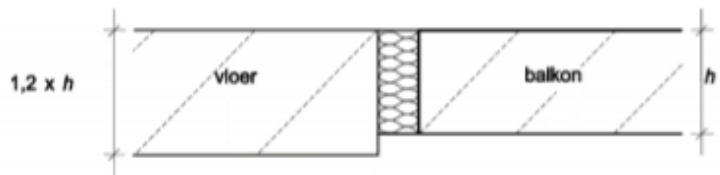
De volledige berekening staat in bijlage C, het komt uit op een E-modulus van 3745 N/mm². Dit zorgt ervoor dat door de rotatie van de vloerrand nu een zakking ontstaat van 28,3 mm. Dit levert een totale zakking op van 38,712 mm.

8 NATIONALE BEOORDELINGSRICHTLIJN (BRL)

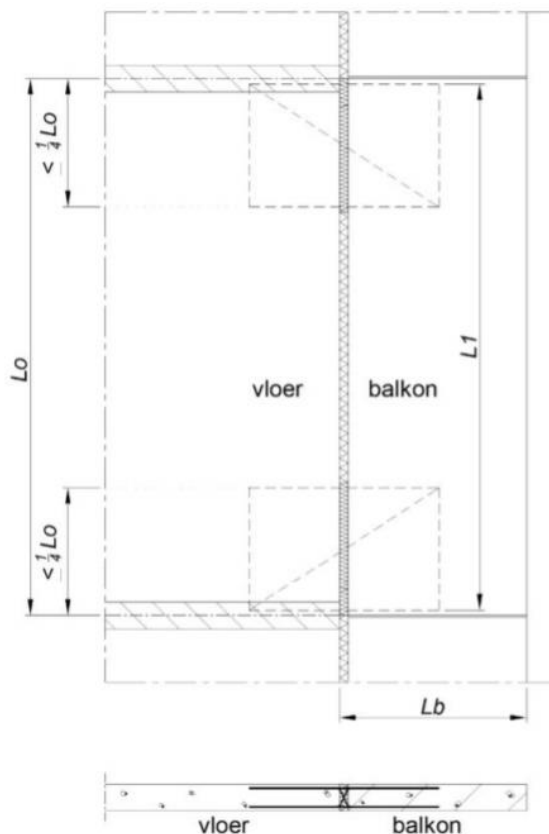
Voor het toepassen van dit type verbinding zijn bepaalde eisen gesteld. Indien de vloer stijver kan worden beschouwd dan het balkon, mag de verbinding toegepast worden over de volledige overspanningslengte. Volgens BRL 0505 mag de vloer stijver worden beschouwd dan het balkon, indien $h_{\text{vloer}} \geq 1.2 h_{\text{balkon}}$, zie figuur 8.1.

Er zijn beperkingen opgesteld m.b.t. het toepassingsgebied van de verbinding, indien er niet aan deze eis wordt voldaan. Bij het niet voldoen aan deze eis, mag de verbinding enkel worden toegepast binnen een kwart van de overspanningslengte, zie figuur 8.2.

Deze eis komt voort uit het feit dat indien de stijfheid van het balkon groter is, de vloer als het ware aan het balkon gaat 'hangen'. Dit betekent dat belasting van de vloer over wordt gedragen naar het balkon (i.p.v. de wanden), wat resulteert in een hogere belasting op de verbinding. Aangezien de vloer en het balkon lokaal verbonden zijn, zal ter plaatse van deze verbinding de rotatie van de vloer en de rotatie van het balkon gelijk moeten zijn. Hiermee wordt bedoeld de rotatie van de vloerrand die staat weergegeven in figuur 8.3. Als het balkon stijver is dan de vloer, zal de vloer belasting af moeten gaan dragen op het balkon om de gelijke rotatie te behouden. De belasting van het balkon moet juist af worden gedragen naar de vloer, dus zal de stijfheid van de vloer groter moeten zijn.



Figuur 8.1 Stijfheidsverschillen



Figuur 8.2 zone waarin de verbinding toegepast mag worden



Figuur 8.3 Schematisering vloerrand met bedoelde rotatie

CONCLUSIE

Doel van dit onderzoek was om een model te creëren waarmee de invloed van bepaalde parameters op de zakking kan worden onderzocht en waarmee onderzocht kan worden of de extreme doorbuiging in het betreffende project verklaard kan worden.

Hiervoor is eerst een studie gedaan naar de doorbuigingscomponenten. Hier kwam uit dat de doorbuigingscomponent waarbij het balkon onder de belasting van het eigen gewicht komt te staan aanzienlijk klein is. De twee doorbuigingscomponenten die daarentegen wel grote invloed hebben zijn de zakking ten gevolge van de rotatie van de vloerrand en de zakking ten gevolge van het roteren van de verbinding. De eerste van de twee componenten is verwerkt in een model om de invloed van de parameters te onderzoeken. De tweede component is dermate gemakkelijk te berekenen dat deze niet in een model gezet hoefde te worden, voor deze component is verder niet ingegaan op de invloed van de parameters aangezien dit direct volgt uit de formule hiervoor. Wel is deze component beschreven en berekend.

De invloed van de parameters op de zakkingscomponent is beschreven in procenten. In onderstaande tabel staat een overzicht van de procentuele veranderingen in de zakkingscomponent ten gevolge van een procentuele toename van de parameter van 5%.

Parameter	Procentuele toename van de parameter [%]	Procentuele toename van de zakking [%]
Dikte van de vloer	5	-14
Overspanningslengte tussen de wanden	5	5
Positie van de verbinding	5 *	46

Tabel 9

*Deze procentuele verandering van 5% betekent in dit geval dat de positie van de verbinding over een lengte van 5% van de overspanningslengte naar binnen schuift.

Uit deze waarden kan de conclusie worden getrokken dat vooral de positie van de verbinding en de dikte van de vloer een grote invloed hebben op de zakking van het balkon. Dit betekent dat het vergroten van de dikte van de vloer en het verplaatsen van de verbinding richting de wand zeer effectieve methoden zijn om de zakking tegen te gaan.

Om te kijken hoe goed dit model de werkelijkheid weergeeft, is dit toegepast op een project waar extreme zakking is gemeten. De extreme zakking van het betreffende project kwam uit op rond de 70 en 80 mm. Dit is veel hoger dan vooraf berekend was. Gebruik makend van het model en de andere zakkingscomponenten, is nu een zakking van 38,712 mm berekend. Ondanks dat er een hoge waarde van de zakking berekend is, is er toch nog een groot verschil met de werkelijk gemeten waarde.

Ten slotte is er nog gekeken wat voor beperkingen de BRL oplegt en of deze verklaard kunnen worden. Voorafgaand werd aangenomen dat de beperking die de BRL oplegt voor het toepassen van deze systemen, betrekking heeft op de zakking van het balkon. Bij nader onderzoek bleek dat deze beperkingen geen betrekking hebben op de zakking van het balkon maar op het stijfheidsverschil tussen de vloer en de balkonplaat. Indien de balkonplaat namelijk stijver is dan de vloer, dan zal de vloer belasting af gaan dragen op het balkon. Dit zorgt ervoor dat er meer krachten komen te staan op de verbinding.

Het leggen van beperkingen op bepaalde parameters om zo de zakkingscomponenten in te perken heeft ook weinig zin. Deze zakkingscomponenten kunnen namelijk zeer gemakkelijk maar daarentegen ook zeer effectief worden tegen gegaan door het balkon simpelweg iets meer op te zetten. Voor het bepalen van de benodigde opzet moeten de componenten echter wel allemaal volledig en correct mee worden genomen. Hierin is de component ten gevolge van de rotatie van de vloerrand dus een aanzienlijke. En de positie van de verbinding heeft hierop een aanzienlijke invloed.

REFERENTIELIJST

Braam, C.R., Walraven, J.C. (2015). *Prestressed concrete*. TU Delft, Delft

KOMO (2016). KOMO attest K7417/07 type KX, KXT, Q, QXT, Q+Q, QXT+QXT, V, D, DXT.

[geraadpleegd op 27-09-2016] beschikbaar via:

https://www.schock.nl/download/947/KOMO_attest_K7417_08_type_K_KXT_Q_QXT_Q_Q_QXT_QXT_V_D_DXT%5B947%5D.pdf

Boelders, T.J.B. (2016). *Een onderzoek naar extreme doorbuiging van prefab balkons bij het gebruik van tunnelbekistingen* (Bachelor eindwerk). TU Delft, Delft.

Nederlands Normalisatie-instituut (2016). *Nederlands Nederlandse norm NEN-EN 1992-1-1+c2 Eurocode 2: Ontwerp en berekening van betonconstructies- Deel 1-1: algemene regels en regels voor gebouwen*. [gedownload op 07-10-2018] beschikbaar via: <https://www.nen.nl/NEN-Shop/Norm/NENEN-199211C22011NB2016-nl.htm>

Kiwa (2007). *BRL0505 + wijzigingsblad Nationale beoordelingsrichtlijn voor wapeningssystemen voor onderbreking van thermische bruggen in beton*. [gedownload op 09-10-2018] beschikbaar via: <https://www.kiwa.com/nl/nl/service/brl-0505-wapeningssystemen-voor-onderbreking-van-thermische-bruggen-in-beton/brl0505-min.pdf>

Nederlands Normalisatie-instituut (2011). *Nederlands Nederlandse norm NEN-EN 1991-1-1+C1 Eurocode 1: Belastingen op constructies- Deel 1-1: Algemene belastingen- Volumieke gewichten, eigen gewicht en opgelegde belastingen voor gebouwen*. [gedownload op 09-10-2018] beschikbaar via: <https://www.nen.nl/NEN-Shop/Norm/NENEN-199111C12011-nl.htm>

FIGUREN

Figuur 2.1: [geraadpleegd op 04-10-2018] beschikbaar via:

https://www.schock.nl/download/1001/Deeldocument_type_K_Vrij_uitkragende_balkons%5B1001%5D.pdf

Figuur 3.1: eigen ontwerp met behulp van deelfiguren [geraadpleegd op 04-10-2018] allen beschikbaar via:

https://www.schock.nl/download/1001/Deeldocument_type_K_Vrij_uitkragende_balkons%5B1001%5D.pdf

Figuur 3.2: [geraadpleegd op 27-09-2018] beschikbaar via:

http://icozct.tudelft.nl/TUD_CT/CT2031/tentamens/files/formuleblad2031-jan-2012.pdf

Figuur 5.1: eigen ontwerp

Figuur 6.1: eigen ontwerp

Figuur 7.1: eigen ontwerp

Figuur 7.1: eigen ontwerp

Figuur 8.1: [geraadpleegd op 09-10-2018] beschikbaar via: <https://www.kiwa.com/nl/nl/service/brl-0505-wapeningssystemen-voor-onderbreking-van-thermische-bruggen-in-beton/brl0505-min.pdf>

Figuur 8.2: [geraadpleegd op 09-10-2018] beschikbaar via: <https://www.kiwa.com/nl/nl/service/brl-0505-wapeningssystemen-voor-onderbreking-van-thermische-bruggen-in-beton/brl0505-min.pdf>

Figuur 8.3: eigen ontwerp

TABELLEN

Tabel 6: [geraadpleegd op 20-09-2018] beschikbaar via:

https://www.schock.nl/download/947/KOMO_attest_K7417_08_type_K_KXT_Q_QXT_Q_Q_QXT_QX_T_V_D_DXT%5B947%5D.pdf

Tabel 6.1: eigen ontwerp, afkomstig van python resultaten

Tabel 6.2: eigen ontwerp, afkomstig van python resultaten

Tabel 6.3: eigen ontwerp, afkomstig van python resultaten

Tabel 6.4: eigen ontwerp, afkomstig van python resultaten

Tabel 6.5: eigen ontwerp, afkomstig van python resultaten

Tabel 9: eigen ontwerp, afkomstig van resultaten in hoofdstuk 6

SYMBOLENLIJST

Symbol	Betekenis	Eenheid
w	<i>Zakking</i>	$[mm]$
φ	<i>Rotatie</i>	$[rad]$
l	<i>Lengte</i>	$[m]$
t_0	<i>representatieve leeftijd beton</i>	$[dagen]$
T	<i>Temperatuur</i>	$[^{\circ}C]$
F	<i>Kracht</i>	$[N]$
E	<i>Elasticiteitsmodulus</i>	$[N/mm^2]$
I	<i>Traagheidsmoment</i>	$[mm^4]$
k	<i>Veerstijfheid</i>	$[kN/m]$
M	<i>Moment</i>	$[kNm]$
V	<i>Dwarskracht</i>	$[kN]$
ρ	<i>Eigengewicht</i>	$[kN/m^3]$
C	<i>Rotatieveer constante</i>	$[kN/rad]$
RH	<i>Relatieve vochtigheid</i>	$[\%]$
E_{cm}	<i>Gemiddelde elasticiteitsmodulus</i>	$[N/mm^2]$
f_{cm}	<i>Gemiddelde betondruksterkte</i>	$[N/mm^2]$
A_c	<i>Oppervlakte betondoorsnede</i>	$[mm^2]$
u	<i>Omtrek betondoorsnede</i>	$[mm]$
d	<i>Nuttige hoogte</i>	$[mm]$
κ	<i>Kromming</i>	$[mm^{-1}]$
ρ_l	<i>wapeningspercentage</i>	$[\%]$
σ	<i>Spanning</i>	$[N/mm^2]$
f_{ctm}	<i>Betontreksterkte</i>	$[N/mm^2]$
ε	<i>Rek</i>	$[-]$
x_u	<i>Hoogte betondrukzone</i>	$[mm]$

BIJLAGEN

BIJLAGE A: BEREKENINGEN VLOEREIGENSCHAPPEN

Representatieve leeftijd beton:

Bij $T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$\left. \begin{aligned} t_0 &= t_{0,T} \left(\frac{9}{2+t_{0,T}^{1.2}} + 1 \right) \\ t_{0,T} &= e^{-\left(\frac{4000}{273+T} - 13,65 \right)} \Delta t \end{aligned} \right\} t_0 = 11,88 \text{ dagen}$$

Sterkte eigenschappen bij gebruik van C20/25:

$$E_{cm} = 30000 \text{ N/mm}^2 \quad f_{cm} = 28 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{cm}(t) = \left(\frac{f_{cm}(t)}{f_{cm}} \right)^{0.3} * E_{cm}$$

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) * f_{cm}$$

$$\beta_{cc}(t) = \exp\left(s \left(1 - \left(\frac{28}{t_0}\right)^{\frac{1}{2}}\right)\right) = 0,90 \quad ; \quad \text{klasse R ; } s = 0,2$$

$$f_{cm}(t) = 0,90 * 28 = 25,16 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{cm}(t) = \left(\frac{25,16}{28} \right)^{0.3} * 30000 = 29052 \text{ N/mm}^2$$

Kruipfactor:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \beta_{cc}(t, t_0) \quad ; \quad \beta_{cc}(t, t_0) = 1$$

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t_0) \left\{ \begin{aligned} \varphi_{RH} &= 1 + \frac{1 - \frac{RH}{100}}{0,1 \sqrt[3]{h_0}} \\ \beta(f_{cm}) &= \frac{16,8}{\sqrt{f_{cm}}} \\ \beta(t_0) &= \frac{1}{0,1 + t_0^{0,2}} \end{aligned} \right.$$

waarin: RH = relatieve vochtigheid = 50%

$h_0 = 2A_c / u$; u = omtrek betondoorsnede, A = oppervlakte betondoorsnede

Invullen voor de genoemde waarden levert een kruipfactor op van:

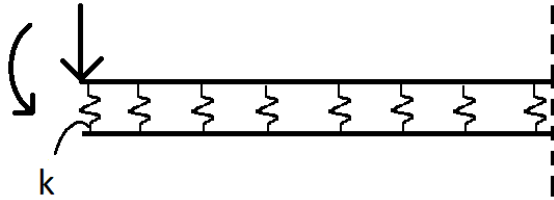
$$\varphi = 1.98$$

De E-modulus ten gevolge van kruip (E_c) verhoudt zich tot de elastische E-modulus (E_{el}) volgens:

$$E_c = E_{el} / (1 + \varphi)$$

Dit levert ons uiteindelijk een E-modulus op van 14705 N/mm^2 .

BIJLAGE B: MODEL VOOR DE STIJFHEID VAN DE VLOERRAND

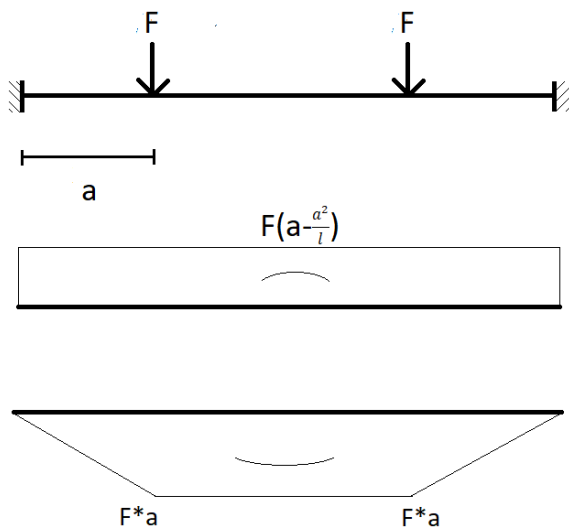


$$EI \frac{d^4 w}{dy^4} + kw = q = 0$$

Berekening veerstijfheid:

$$w = \int_0^l \frac{M(x)}{EI} * \frac{dM(x)}{dF} dx$$

Momentenlijn:



$$M(x) = -F(a - \frac{a^2}{l})$$

$$M(x) = Fx \quad ; \quad \begin{cases} 0 \leq x \leq a \\ l-a \leq x \leq l \end{cases}$$

$$M(x) = F * a \quad ; \quad a \leq x \leq l-a$$

Vanwege symmetrie en dezelfde waarde voor F:

$$w = \int_0^l \frac{M(x)}{EI} * \frac{1}{2} \frac{dM(x)}{dF} dx$$

$$w = 2 \int_0^a \frac{F \left(\frac{a^2}{l} - a + x \right)}{EI} * \frac{1}{2} \left(\frac{a^2}{l} - a + x \right) dx + \int_a^{l-a} \frac{\frac{Fa^2}{l}}{EI} * \frac{1}{2} \frac{a^2}{l}$$

$$w = \frac{F}{2EI} \left(-\frac{a^4}{l} + \frac{2}{3}a^3 \right) \left\{ k = \frac{2EI}{\left(-\frac{a^4}{l} + \frac{2}{3}a^3 \right)} \right.$$

$$k = \frac{F}{w}$$

Uitwerken DV:

$$EI \frac{d^4 w}{dy^4} + 4\alpha^4 w = 0, \quad \alpha^4 = \frac{k}{4EI}$$

$$w(y) = e^{\alpha x} [C_1 \cos \alpha x + C_2 \sin \alpha x] + e^{-\alpha x} [C_3 \cos \alpha x + C_4 \sin \alpha x]$$

Randvoorwaarden:

$$y = 0 \begin{cases} M = -M_{balkon} = -EI w'' \\ V = -V_{balkon} = -EI w''' \end{cases} \quad (\text{vloerrand})$$
$$y = \infty; \quad w = 0$$

$$y = \infty; \quad w = 0 \quad \longrightarrow \quad C_1 = 0, C_2 = 0$$

Resterende deel differentiaalvergelijking:

$$w(y) = e^{-\alpha y} [C_3 \cos \alpha y + C_4 \sin \alpha y]$$

$$\varphi(y) = \alpha e^{-\alpha y} [(-C_3 + C_4) \cos \alpha y + (-C_3 - C_4) \sin \alpha y]$$

$$M(y) = -EI [\alpha^2 e^{-\alpha y} (-2C_4 \cos \alpha y + 2C_3 \sin \alpha y)]$$

$$V(y) = -EI \alpha^3 e^{-\alpha y} [2(C_3 + C_4) \cos \alpha y + 2(-C_3 + C_4) \sin \alpha y]$$

$$y = 0; \quad M = -M_{balkon} = 2EI \alpha^2 C_4 \quad \longrightarrow \quad C_4 = -\frac{M_{balkon}}{2EI \alpha^2}$$

$$y = 0; \quad V = -V_{balkon} = -2EI \alpha^3 (C_3 + C_4) \quad \longrightarrow \quad C_3 = \frac{V_{balkon}}{2EI \alpha^3} - C_4$$

Nu is de formule voor de hoekverdraaiing bekend, we hebben echter alleen de hoekverdraaiing op $y=0$ nodig (vloerrand):

$$\varphi(0) = \alpha e^{-\alpha y} [(-C_3 + C_4) \cos \alpha y + (-C_3 - C_4) \sin \alpha y] = \alpha (-C_3 + C_4)$$

$$I = \frac{1}{12} b h^3$$

Met b de breedte van de verbinding en h de dikte van de vloer.

$$M_{balkon} = V_{balkon} * \frac{1}{2} l_{balkon}$$

$$V_{balkon} = \frac{l * b}{n} * (\rho * d)$$

Met l , b en d respectievelijk de lengte, breedte en dikte van de balkonplaat. ρ is het eigengewicht van beton.

Deze berekening is verwerkt in een python model. Dit python model heeft de volgende variabelen als input (kunnen dus aangepast worden) :

- Breedte van de verbinding (en dus van de strip)
- Dikte van de vloer
- Afmetingen van het balkon (lengte, breedte en dikte)
- Positie van de verbinding
- Betonsterkte (f_{cm} en E_{cm})

Het model is verwerkt in een pythonscript:

```
def wvloerrand(xv,bver,hvloer,lb,bb,db, Ecm, fcm):  
    #sterkteontwikkeling beton  
    T = 80  
    t0T = np.exp(-((4000/(273+T))-13.65))*(2/3)  
    t0 = t0T * ((9/(2+t0T**1.2))+1)  
    fcmt = np.exp(0.2*(1-((28/t0)**0.5)))*fcm  
    E = ((fcmt/fcm)**0.3)*Ecm  
  
    #kruip  
    h0 = (2*(bver*10**3)*(hvloer*10**3))/(2*bver*10**3 + 2*hvloer*10**3)  
    phi1 = (16.8/np.sqrt(fcm)) * (1/(0.1+(t0**0.2))) * (1+(1-(50/100))/(0.1+(h0**(1/3))))  
    E = E/ (1+phi1)  
  
    #belasting  
    rho = 24.5  
    qper = 0  
    qvar = 0  
    Vbalkon = (rho*db*lb*bb)/2  
    Mb = Vbalkon *0.5*lb  
  
    #eigenschappen van de balk + DV  
    I = (1/12)*bver*(hvloer**3)  
    k = (2*E*I)/(-(xv**4)/bb)+(2/3)*xv**3  
    a = (k/(4*E*I))**(1/4)  
    c4 = Mb/(-2*E*I*(a**2))  
    c3 = (Vbalkon/(2*(a**3)*E*I))-c4  
    phi = a*(-c3+c4)  
  
    return -phi*lb*10**3
```

BIJLAGE C: BEREKENING GESCHEURDE ELASTICITEITSMODULUS

- d 210 mm
- h 240 mm
- b 2000 mm
- f_{cd} 13,3 N/mm²
- f_{yd} 435 N/mm²
- β 7/18
- M (ULS) 127,2 kNm
- M (SLS) 97,85 kNm

ULS berekening voor ρ_l :

$$N_c * (d - \beta x_u) = 127,2 * 10^6$$

$$0,75 * b * x_u * f_{cd} * (d - \beta x_u) = 127,2 * 10^6$$

$$x_u = 32,2 \text{ mm}$$

$$N_c = N_s ; \quad 0,75 * x_u * b * f_{cd} = f_{yd} * \rho_l * d * b$$

$$\rho_l = 0,0035$$

SLS Berekening:

$$\frac{x}{d} = -\alpha E \rho l + \sqrt{(\alpha E \rho l)^2 + 2 \alpha E \rho l} ; \quad \alpha_E = E_s/E_c ; \quad E_c = E_{cm} / (1 + \text{kruipfactor}) = 10000 \text{ N/mm}^2$$

$$\frac{x}{d} = 0,31$$

$$x = 65,1 \text{ mm}$$

$$\text{Vloeien staal: } \sigma_s = 425 \text{ N/mm}^2, \quad \varepsilon_s = 0,002175$$

$$M_{ys} = \sigma_s * \rho_l * d * b * (d - \frac{1}{3} x) = 120,4 \text{ kNm}$$

$$\kappa_{ys} = 0,002175 / (d - x) = 1,5 * 10^{-5} \text{ mm}^{-1}$$

$$\text{rek uiterste betonvezel: } \varepsilon_{cu} = \frac{\varepsilon_s}{d - x} * x = 0,00098$$

$$\sigma_{cu} = \varepsilon_{cu} * E_c = 9,77 \text{ N/mm}^2 \leq f_{cd} ; \text{ voldoet}$$

$$M_{cr} = \frac{1}{6} * b * h^2 * f_{ctm} = 38,2 \text{ kNm}$$

$$\kappa_{cr} = M_{cr} / (E_c I) = 1,66 * 10^{-6} \text{ mm}^{-1}$$

Met behulp van deze twee punten kan de rode lijn getekend worden. MSLS is bekend, via de rode lijn kan de bijbehorende kromming bepaald worden. Vervolgens kan de E-modulus berekend worden volgens:

$$E = \frac{M}{\kappa * I}$$

Hieruit volgt een E-modulus van: 3745 N/mm².

