

BSc Eindwerk: Eindrapport

Uitkragende betonnen galerijplaten van de Antillenflat.



Antillenflat in Leeuwarden, de ingestorte galerijplaten.

Student: Maarten Meek, 4097882

Begeleiders: Dr.ir.drs. C.R. Braam
Dr. Ir. P.C.J. Hoogenboom

Sectie: Structural Engineering
Civiele Techniek
Technische Universiteit Delft

Delft, juni 2016

Voorwoord

Dit rapport is geschreven in het kader van CTB3000 Bachelor eindwerk van de studie Civiele Techniek aan de Technische Universiteit Delft. Het werk is uitgevoerd in de vierde periode van het studiejaar 2015-2016 ter afronding van mijn bachelor. Als vervolg studie wil ik de master opleiding Structural Engineering doen aan de TU Delft en het onderwerp voor dit eindwerk is in deze richting gekozen.

De studie in dit rapport is een vervolg studie op het bachelor eindwerk dat is gedaan door D.L. Klusener in het eerste kwartaal van het studiejaar 2015-2016. In zijn werk is gekeken naar de oorzaak van het instorten van de galerijplaten van de Antillenflat in Leeuwarden. In dit vervolg onderzoek wordt gekeken naar de draagkracht van de uitkragende galerijplaten. De vloeilijnen theorie die hiervoor is toegepast was kennis die voor mij nog onbekend was. Dit wordt pas in de master geleerd en leek mij daarom een leuke uitdaging om te leren en toe te kunnen passen in mijn werk.

Het was zeer interessant om de geleerde stof van de bachelor toe te passen op een bestaande situatie. Met programma's als Scia-Engineering en LimitState:SLAB heb ik kunnen zien hoe de kennis die ik heb geleerd toe te passen is en overeenkomt met de hand berekeningen die zijn uitgevoerd.

Ik wil mijn begeleiders Dr.ir.drs. C.R. Braam en Dr. ir. P.C.J. Hoogenboom erg bedanken voor hun hulp tijdens mijn bachelor eindwerk. Met de vragen die ik had kon ik goed bij hen terecht en meneer Hoogenboom heeft mij een handige speed-cursus van de vloeilijnen theorie gegeven.

Inhoudsopgave

Voorwoord	1
Inleiding.....	3
Samenvatting	4
1. Antillenflat.....	5
1.1 Bouw galerijplaat	5
1.2 Bouwfout en corrosie.....	5
1.3 Constructie Antillenflat	6
1.4 Belastingen.....	7
2. Vloeilijnen theorie.....	8
2.1 De theorie	8
2.2 Maatgevend vloeilijnenpatroon	9
2.3 Corrosie aan de wapening	12
2.4 LimitState:SLAB	14
3. Momentenverdeling	16
3.1 Scia-model.....	16
3.2 Vloeien van de wapening.....	17
4. Controleren van de galerijplaten	20
4.1 Controle zone.....	20
4.2 Ferroscan.....	21
4.3 Chloride concentratie	21
4.4 Herstelmogelijkheden.....	21
Conclusie	23
Bronvermelding	26
Bijlage	27

Inleiding

In mei 2011 is er in Leeuwarden een galerijplaat van de Antillenflat bezweken. Het was de galerijplaat van de negende verdieping die bezweek; deze is omlaag gevallen en heeft daarbij de ondergelegen galerijplaten met zich meegenomen. Gelukkig is er bij dit incident niemand gewond geraakt. Er is onderzocht wat de oorzaak hiervan is geweest en dit zal kort worden toegelicht in dit rapport. De Antillenflat is opgeleverd in 1965. In die periode zijn vele flats op vergelijkbare wijze geconstrueerd met soortgelijke galerijplaten. Het is daarom van belang om meer te weten over dit soort galerijplaten.

De hoofdvraag van dit bachelor eindwerk luidt als volgt:

'In hoeverre zijn de galerijplaten van de Antillenflat veilig bij het optreden van de maatgevende belastingen?'

De volgende subvragen worden gesteld om een antwoord te kunnen vormen op de hoofdvraag:

- *Welk bezwijkmechanisme treedt er op bij de maatgevende belastingen?*
- *Hoeveel wapening is er nodig om de veiligheid te waarborgen?*
- *Waar moeten inspecties worden uitgevoerd om de wapening te controleren?*

In dit rapport wordt er gekeken naar de galerijplaten van de Antillenflat en hoe deze betonnen platen worden onderworpen aan verschillende belastingen. Een variabele lijnlast, die aangrijpt aan de rand van de uitkragende galerijplaten, wordt bekeken. De locatie en grootte van deze belasting varieert. Er wordt gecontroleerd of de galerijplaten voldoen aan de normen die zijn opgesteld voor deze lijnlast en in hoeverre dit (on)veilig is.

Om tot antwoorden te komen op de hoofdvraag en de subvragen is de opbouw van dit onderzoek als volgt:

De constructie van de Antillenflat wordt eerst toegelicht en hoe het zo ver is gekomen dat één van de galerijplaten is bezweken. Vervolgens is de vloeilijnen theorie toegepast waarmee bezwijkmechanismen zijn onderzocht en hieruit volgt een locatie en een laagste opneembare waarde voor de variabele lijnlast. Dit is de maatgevende lijnlast. Voor dit bezwijkmechanisme is onderzocht wat voor wapening er nodig is om te voldoen aan de norm. Verder wordt de momentenverdeling van de galerijplaat bekeken om de kritische zones te vinden van de galerijplaten.

Uiteindelijk wordt er kort ingegaan op het uitvoeren van een controle op de galerijplaten.

Samenvatting

Een galerijplaat van de Antillenflat is mei 2011 bezweken; dit is 46 jaar nadat de flat was opgeleverd. Dit is gekomen doordat de wapening in de betonnen plaat te veel was aangetast door corrosie, met als gevolg een afname van het effectieve oppervlak van het wapeningsstaal dat de galerijplaat deed bezwijken.

De maatgevende lijnlast q_{II} waar naar gezocht wordt volgt uit de normen van het NEN8701. Buiten de permanente belasting en de variabele verdeelde belasting voldoet een galerijplaat als deze hierbij een lijnlast van 5,0 kN/m kan dragen over een lengte van 1 meter aan de vrije rand van de plaat. Uit deze norm volgt ook dat er gerekend wordt met het 'verbouwniveau' hetgeen inhoudt dat de permanente belastingen een factor $\gamma_G = 1.15$ en de variabele belastingen een factor $\gamma_Q = 1.30$ hebben.

Met behulp van de vloeilijnen theorie en LimitState is er gezocht naar de maatgevende positie voor de lijnlast q_{II} . Zowel uit de theorie als uit LimitState volgt dat de maatgevende positie van de lijnlast aangrijpt op een hoek of een voeg van een galerijplaat.

De galerijplaten van de Antillenflat voldoen aan de normen en kunnen de lijnlast van 5,0 kN/m samen met de overige belastingen dragen. De galerijplaten kunnen in ideale staat een lijnlast van 7,87 kN/m dragen. Echter is deze ideale staat niet overal in de Antillenflat aanwezig. Doordat er corrosie is opgetreden in delen van de Antillenflat is de effectieve diameter verminderd. De diameter van het wapeningsstaal mag maximaal met 8,6% zijn afgenomen om te voldoen aan de lijnlast q_{II} met een grote van 5,0 kN/m. In dat geval zijn de galerijplaten veilig.

Het is belangrijk dat de wapening wordt gecontroleerd in de kritische zones van de galerijplaten. Dit blijkt te zijn bij de locatie waar de plaat is ingeklemd bij de draagwand die de woningen scheidt. In dit gebied zal een deel van de wapening al aan het vloeien zijn hetgeen betekent dat het bezwijkmechanisme al deels tot stand is gekomen. De wapening die zijn vloeispanning heeft bereikt kan geen moment meer opnemen. Het resterende moment zal worden herverdeeld naar de nabij gelegen wapening, dat als gevolg kan hebben, dat deze wapening ook zijn vloeispanning kan bereiken. Als het volledige maatgevende vloeilijnenpatroon is bereikt, doordat de wapening daar is gaan vloeien, zal de galerijplaat bezwijken.

Bij het controleren van de galerijplaten is het belangrijk dat de kritische gebieden, waar de hoogste momenten optreden en het vloeilijnen patroon loopt, goed worden onderzocht. Met behulp van een ferroskan kan dit worden gecontroleerd en als de wapening niet voldoet aan de eisen, moeten er maatregelen worden genomen.

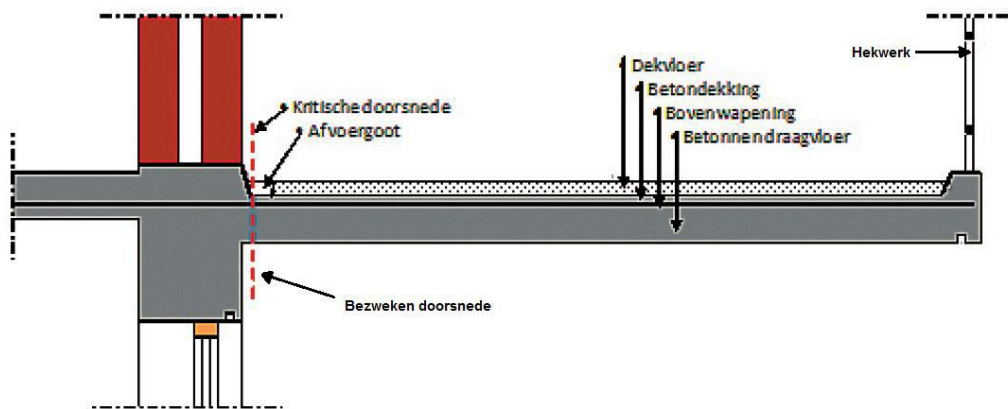
1. Antillenflat

In dit hoofdstuk wordt de constructie van de Antillenflat toegelicht. Eerst wordt er gekeken naar de galerijplaten, wat er is gebeurd en waardoor er een is bezwaken. Vervolgens wordt de verdere constructie van de flat beschreven en een betere diepgang hierin wordt beschreven in de komende hoofdstukken.

1.1 Bouw galerijplaat

De Antillenflat is gebouwd in 1965 voor een levensduur van minstens 50 jaar. Echter 46 jaar na de bouw bezweek er op 23 mei 2011 een galerijplaat. De galerijplaat bevond zich op de negende verdieping (de vijfde woonetage) en heeft de galerijplaten van de onderliggende verdiepingen met zich mee genomen. Bijlage 1 geeft een overzicht weer van de Antillenflat.

In figuur 1.1 is een doorsnede van een uitkragende galerijplaat weergegeven.



Figuur 1.1 Schematische weergave van een uitkragende betonnen plaat van de Antillenflat. (1)

De uitkragende platen zijn gemaakt van gewapend beton en dienen de (permanente en variabele) belastingen af te dragen naar de aanliggende verdiepingvloeren. Via de vloeren worden de krachten afgedragen naar de draagwanden van de flat.

Uit onderzoek van Econstruct(2) blijkt het originele ontwerp van de uitkragende galerijplaten de volgende uitgangspunten te hebben:

- Beton sterkteklasse K225 (komt overeen met hedendaags C20/25)
- Plaatdikte van 120 mm
- Betonstaalkwaliteit QRn48
- Wapening met diameter 6 mm en h.o.h. 100 mm
- Dekking van 15 mm

1.2 Bouwfout en corrosie

Nadat de galerijplaten waren ingestort is er onderzoek gedaan om erachter te komen wat de oorzaak is geweest van het bezwijken. Bij deze onderzoeken zijn er meerdere gebreken ontdekt bij de galerijplaten van de Antillenflat. De galerijplaten waren niet gebouwd zoals ze waren ontworpen en er was (put)corrosie opgetreden waardoor de wapening was verzwakt.

- De plaatdikte is 130 mm in plaats van 120 mm
- Een dikkere afwerklaag is toegepast
- Dekking van 40 mm in plaats van 15 mm
- Scheurtjes direct na de bouw in de kritische doorsnede (bij de afvoergoot)

Vanwege de scheurtjes die vrijwel meteen na de bouw ontstonden (en niet zichtbaar waren door de afwerklaag) konden er chloriden de plaat indringen met als gevolg putcorrosie in de wapening. Bij sommige extreme plekken had de putcorrosie 50% van de wapening effectief vermindert.

1.3 Constructie Antillenflat

De galerijplaat zit vast gelegen aan de binnenliggende vloer van de woning, aan elke gevelzijde heeft de gewapende vloer een dikte van 290 mm tot 1,7 meter de woning in. In figuur 1.2 is een schematische weergave ervan (dit is een weergave van het originele ontwerp met een galerijplaat dikte van 120 mm). In bijlage 2 staat een originele tekening van dit constructiedeel.



De galerijplaat zit ingeklemd vast aan de vloer, de belastingen op de galerijplaten worden afgedragen naar deze vloer en deels naar de draagwanden. De woningen hebben een breedte van 4,5 meter, om deze 4,5 meter is er een scheidingswand van 200 mm dik gewapend beton. In bijlage 2 en 3 zijn staan de originele tekeningen hiervan.

De scheidingswanden zijn de draagwanden van de flat; de belastingen worden afgedragen via de platen en vloeren naar deze wanden. Doordat er zich om de 4,5 meter een wand bevindt, zal rondom deze wand de galerijplaat steviger zijn ingeklemd, hetgeen betekent dat de inklemming bij de wand meer moment tot zich zal trekken vergeleken met de rest van de galerijplaat. In hoofdstuk 3 wordt hier naar gekeken.

1.4 Belastingen

De belastingen die plaats vinden op de galerijplaten bestaan uit permanente belastingen en variabele belastingen. De permanente belastingen bestaan uit het eigen gewicht van het beton (25 kN/m^3) en de hierop liggende afwerklaag (13 kN/m^3). Aan de rand van de galerijplaat bevindt het hekwerk, deze vloerafscheiding geeft voor een permanente belasting van $0,7 \text{ kN/m}$ op de rand van de uitkragende plaat.

De variabele belastingen worden aangenomen volgens NEN 8701 (6). Deze norm geldt voor het beoordelen van de constructieve veiligheid van bestaande constructies te Nederland. NEN 8701 verwijst naar de belastingen die worden toegepast volgens NEN-EN 1991-1-1 (7) die de volgende variabele belastingen hanteert:

- Een gelijkmatig verdeelde belasting van $2,0 \text{ kN/m}^2$ voor galerijen/ontsluitingswegen
- Voor plaatselijke toetsingen, wat bij galerijen het geval is:
 - o Een puntlast van $3,0 \text{ kN}$ (op $0,5 \times 0,5 \text{ m}^2$) of
 - o Een lijnlast van $5,0 \text{ kN/m}$, binnen een afstand van 0,1 meter van de vrije rand met een lengte van 1 meter

Voor de plaatselijke toetsingen zal de lijnlast van $5,0 \text{ kN/m}$ worden aangenomen; deze belasting is maatgevend en is in dit geval van het onderzoek van belang. In het geval van combinatiegevallen en het toetsen van vloeren/galerijplaten staat er in NEN 8701 dat het 'verbouwniveau' toegepast kan worden. Dit geeft de factoren voor permanente belastingen $\gamma_G = 1,15$ en voor variabele belastingen $\gamma_Q = 1,30$.

De volgende belastingen vinden er plaats op de galerijplaat:

Permanente belasting:

- $0,13 \cdot 25 + 0,04 \cdot 13 = 3,25 + 0,52 = 3,77 \text{ kN/m}^2$
- $0,7 \text{ kN/m}$ aan de rand van de galerijplaat

Variabele belasting:

- $2,0 \text{ kN/m}^2$
- een lijnlast van $5,0 \text{ kN/m}$ over 1 meter aan de vrije rand

2. Vloeilijnen theorie

Om de draagkracht en de maatgevende lijnlast te vinden van de galerijplaten wordt de vloeilijnen theorie toegepast. In dit hoofdstuk wordt de theorie eerst kort toegelicht en vervolgens toegepast. In de CUR-Publicatie 248 2^e herziene uitgave staat een korte toelichting voor het toepassen op de galerijplaten. Deze aanpak wordt gebruikt en vergeleken met de formuleringen uit de theorie.

2.1 De theorie

Bij de vloeilijnen theorie wordt er gekeken naar de plastische draagkrachten van constructies, dat wil zeggen dat de wapening in het beton zal gaan vloeien. Uit het dictaat *Plasticity CT4150* (8) en *Practical Yield Line Design* (9) is de volgende opzet voor de theorie samengevat.

Wat is een vloeilijn? Een vloeilijn is een scheur in een gewapende betonnen plaat waarover de wapening is gaan vloeien doordat deze zijn vloeispanning heeft bereikt. Over deze scheurlijn vindt plastische rotatie plaats. De vloeilijn functioneert als een scharnier en vormt een mechanisme.

Wat is de vloeilijnen theorie? Het is een analyse in de uiterste grenstoestand, de UGT. Momenten of belastingen worden gevonden waarbij een element bezwijkt. In de UGT bezwijkt een element, zo'n element is dan verdeeld in vormvaste delen, die gescheiden zijn door de vloeilijnen. Deze vormvaste delen roteren om de vloeilijnen en om hun rotatie-as, hetgeen vaak de opleggingen zijn. Het werk, dat wordt opgenomen door de rotaties in de scharnieren, wordt gelijk gesteld aan het werk verricht door de belastingen. Dit is de vloeilijnen theorie waarmee de maatgevende belastingen kunnen worden gevonden.

De arbeid methode. De (virtuele) arbeid methode is de eenvoudigste manier voor het toepassen van de vloeilijnen theorie. Het idee is dat de verrichte arbeid intern en extern gebalanceerd is. Dus, bij het bezwijken, moet de externe energie veroorzaakt door de belastingen op het element gelijk zijn aan de inwendige energie opgenomen in de vloeilijnen.

External energy expended by loads moving	=	Internal energy dissipated by rotations about yield lines
Expended	=	Dissipated
E	=	D
$\Sigma (N \times \delta)$ for all regions	=	$\Sigma (m \times l \times \theta)$ for all regions

where

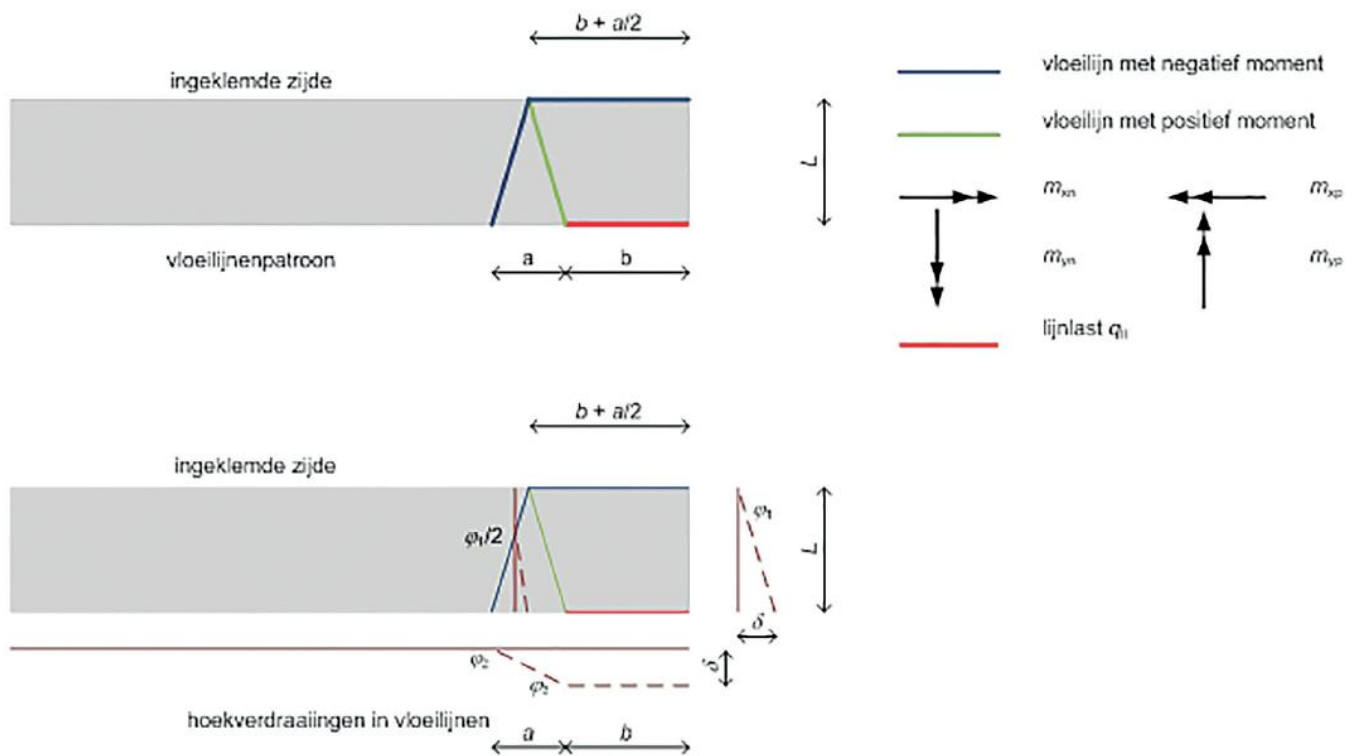
N = load(s) acting within a particular region [kN]
 δ = the vertical displacement of the load(s) N on each region expressed as a fraction of unity [m]
m = the moment in or moment of resistance of the slab per metre run [kNm/m]
l = the length of yield line or its projected length onto the axis of rotation for that region [m]
 θ = the rotation of the region about its axis of rotation [m/m]

Figuur 2.1 Samenvatting van de arbeid methode van de vloeilijnen theorie. (9)

Om de vloeilijnen theorie toe te passen moet er een vloeilijnen patroon ontwikkeld worden. In dit geval zijn er voor de galerijplaat meerdere patronen mogelijk; één ervan zal als resultaat de laagste draagkracht tonen. Dit patroon is daarmee maatgevend en zal de maximale draagkracht van de constructie tonen.

2.2 Maatgevend vloeilijnenpatroon

Er zijn verschillende vloeilijnenpatronen onderzocht, in bijlage 2 van de CUR-Publicatie (1) staat dat het vloeilijnenpatroon in figuur 2.2 maatgevend. In bijlage 4 zijn de andere vloeilijnenpatronen die berekend zijn weergegeven. Er is van uit gegaan dat de uiterst opneembare momenten constant van grote zijn over de lengte van de vloeilijnen. In het volgende hoofdstuk wordt er naar de momentverdeling gekeken en wordt er dieper hierop ingegaan.



Figuur 2.2 Maatgevend vloeilijnenpatroon volgens de tweede bijlage van de CUR-Publicatie. (1)

Het vloeilijnenpatroon uit figuur 2.2 geeft de locatie aan waarbij de lijnlast aangrijpt op de hoek van een galerijplaat (ook het geval bij de aanwezigheid van een voeg). Uit NEN-EN 1991-1-1 (7) is de lengte van de lijnlast q_{II} gelijk aan 1 meter, in de figuur 2.2 is dat de afstand van b en weergegeven als de rode lijn. De uiterst opneembare lijnlast hiervoor wordt gevonden door de inwendige en uitwendige arbeid gelijk aan elkaar te stellen zoals eerder is gesteld.

De uitwendige arbeid wordt beschreven door de rekenwaarde van de belastingen en de zakking van de plaat door de lijnlast q_{ll} . De uitwendige arbeid luidt als volgt:

$$Au := p_{ed} \left(\frac{1}{2} b L d + \frac{1}{4} a L d \right) + q_{ed} \left(b d + \frac{1}{2} a d \right) + q_{ll} b d$$

Hierin staat het volgende voor;

p_{ed} : gelijkmatig verdeelde last(eigen gewicht + variabele belasting)

q_{ed} : lijnlast door vloerafscheiding

d : zakking

L : lengte plaat; 1,265 m

b : breedte q_{ll} ; 1 m

a : afstand tussen vloeilijnen in meter

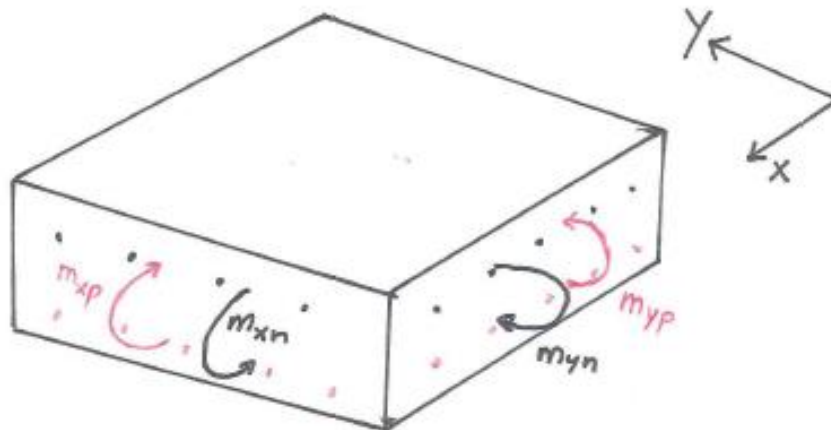
q_{ll} : lijnlast op de rand van de uitkraging

De inwendige arbeid wordt beschreven door de arbeid in de vloeilijnen door de vloeimomenten en de hoekverdraaiingen die daarbij optreden . Voor schuine vloeilijnen wordt dit ontbonden in de twee orthogonale richtingen. De hoekverdraaiing is omgeschreven naar de arm en de zakking zodat deze variabele daarmee als onbekende is weggefallen. De inwendige arbeid is vervolgens beschreven door de volgende formule.

$$Ai := \frac{\left(b + \frac{1}{2} a \right) m_{xn} d}{L} + \frac{1}{4} \frac{a (m_{xp} + m_{xn}) d}{L} + \frac{L (m_{yp} + m_{yn}) d}{a}$$

De vier momenten die hier staan beschreven staan in figuur 2.3 geschetst. De rode momenten, m_{xp} en m_{yp} , zijn de momenten die worden opgevangen door de onderwapening als deze hun plastisch moment bereiken. De betonnen galerijplaten van de Antillenflat bevatten alleen bovenwapening, deze twee momenten zijn daarom gelijk aan nul.

De zwarte momenten, m_{yn} en m_{xn} , zijn de momenten in de boven wapening als deze hun plastische spanning bereiken. In het geval van de Antillenflat is m_{xn} het moment in de hoofdwapening van $\phi 6-100$ mm en m_{yn} de verdeelwapening van $\phi 5-130$ mm.



Figuur 2.3 Optredende momenten in een plaat

Nu de inwendige en uitwendige arbeid geformuleerd zijn, kunnen deze aan elkaar gelijk gesteld worden. Door dit te doen valt de variabele van de zakking d weg en kan de formule herschreven worden als een functie q_{lla} voor de lijnlast q_{ll} waarbij de enige variabele a is.

$$q_{lla} := -\frac{1}{4} \frac{L^2 a^2 p_{ed} + 2L^2 a b p_{ed} + 2L a^2 q_{ed} + 4L a b q_{ed} - 4L^2 m_{yn} - 3a^2 m_{xn} - 4a b m_{xn}}{a L b}$$

Om de laagste waarde van q_{ll} te vinden wordt er gedifferentieerd over a , door deze differentiaal gelijk aan nul te stellen wordt de waarde van a_{min} gevonden. a_{min} is de grootte van a waarbij de laagste waarde voor q_{ll} wordt gevonden.

a_{min} wordt beschreven als volgt:

$$a_{min} := -\frac{2\sqrt{-(L^2 p_{ed} + 2L q_{ed} - 3 m_{xn}) m_{yn} L}}{L^2 p_{ed} + 2L q_{ed} - 3 m_{xn}}$$

De waardes die nodig zijn om a_{min} te vinden zijn bekend. Voor de belastingen is het volgende aangenomen waarbij de factoren γ_G en γ_Q volgens het verbouwniveau zijn meegenomen:

- $p_{ed} = 3,77 * 1,15 + 2,0 * 1,3 = 6,94 \text{ kN/m}^2$
- $q_{ed} = 0,7 * 1,15 = 0,81 \text{ kN/m}$

De momenten m_{xp} en m_{yp} zijn gelijk aan nul. Het moment m_{xn} is gelijk aan 9,72 kNm, dit is berekend in het bachelor eindwerk "Uitkragende betonplaten" door D.L. Klusener (10). De waarden van $f_{yd} = 417,4 \text{ N/mm}^2$ en $f_{cd} = 13,3 \text{ N/mm}^2$ zijn de rekenwaarde van het staal en beton. In het werk van D.L. Klusener wordt beschreven dat de betonkwaliteit K225 en staalkwaliteit QRn48 hieraan voldoen.

Het bezwijkmoment m_{yn} is op dezelfde manier berekend als m_{xn} , deze theorie komt van het vak CTB2220 Beton- en Staalconstructies en het bijhorende dictaat (11) wat in het tweede jaar van Civiele Techniek wordt gegeven.

$$m_{yn} = (d - 0,39x_u) * N_{sy}$$

De verdeelwapening heeft diameter 5 mm met h.o.h. 130 mm.

$$A_s = \frac{1}{4} * \pi * D^2 * \frac{1000}{130} = \frac{1}{4} * \pi * 5^2 * \frac{1000}{130} = 151 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

$$N_{sy} = A_s * f_{yd} = 151 * 417,4 = 63 \text{ kN}$$

De verdeelwapening ligt onder de boven wapening, hieruit volgt d:

$$d = 130 - 40 - 6 - \frac{1}{2} * 5 = 81,5 \text{ mm}$$

$$x_u = \frac{N_{sy}}{0,75 * f_{cd} * b} = \frac{63 * 10^3}{0,75 * 13,3 * 1000} = 6,3 \text{ mm}$$

Hieruit volgt een momentopname voor de verdeelwapening van:

$$m_{yn} = (81,5 - 0,39 * 6,3) * 10^{-3} * 63 = 4,98 \text{ kNm/m}$$

Met deze waarden wordt een $a_{\min}$ gevonden van $a_{\min} = 1,41$ meter. Door deze waarde voor a in te vullen in de eerder geformuleerde waarde van q_{II} vindt men de maatgevende lijnlast $q_{II} = 11,42 \text{ kN/m}$. De lijnlast geldt hier als een variabele belasting, om de werkelijke waarde ervan te krijgen wordt de gevonden lijnlast gedeeld door factor γ_Q .

$$q_{II, \text{maatgevend}} = \frac{q_{II}}{\gamma_Q} = \frac{11,42}{1,3} = 8,79 \text{ kN/m}$$

Het blijkt dat de galerijplaat een lijnlast van $8,79 \text{ kN/m}$ kan dragen. Deze maatgevende waarde ligt hoger dan de geëiste $5,0 \text{ kN/m}$ volgens de NEN-EN 1991-1-1. Hieruit is te concluderen dat de galerijplaten van de Antillenflat voldoen aan de eisen. Echter is er in dit geval van uit gegaan dat de wapening in de platen nog volledig intact zijn, zoals eerder is vermeld, heeft er corrosie plaats gevonden in delen van de wapening. Dit wordt in de volgende paragraaf verder bekeken.

In tabel 2.1 staan de uiterst opneembare lijnlasten van twee andere berekende vloeilijnenpatronen. Bijlage 4 geeft de andere patronen weer en in bijlage 5 staan de opgestelde formules voor deze vloeilijnen patronen. De lijnlast met de laagste waarde is maatgevend en dat is in dit geval de waarde bij het vloeilijnen patroon van figuur 2.2.

Tabel 2.1 Maximale lijnlasten van verschillende vloeilijnenpatronen.

Vloeilijnen patroon	1	2	3
Lijnlast q_{II} in kN/m	8,79	15,66	16,39

Uit de tabel is te zien dat het eerste vloeilijnenpatroon, het patroon dat in deze paragraaf is berekend, de laagste waarde voor q_{II} geeft. Hiermee klopt het dat dit vloeilijnenpatroon het maatgevende patroon is. Dit wordt in paragraaf 2.4 vergeleken met de uitkomsten van het programma LimitState.

2.3 Corrosie aan de wapening

Volgens de eerder berekende maatgevende lijnlast $q_{II} = 8,79 \text{ kN/m}$ zouden de galerijplaten van de Antillenflat voldoen aan de eisen. Doordat er corrosie heeft plaats gevonden aan de wapening is dit niet het geval geweest. Vanwege de corrosie is de effectieve diameter van de wapening afgenomen, hieruit volgt een lager wapeningsoppervlak.

Door deze afnames zal er een lagere momentopname mogelijk zijn, de waarden m_{xn} en m_{yn} nemen af. Dit heeft als resultaat dat de uiterste opneembare lijnlast q_{II} ook lager zal zijn. Er wordt gekeken in hoeverre deze afname mag zijn zodat er nog wordt voldaan aan de eisen, met andere woorden; hoeveel mag de wapening gecorrodeerd zijn zodat het nog een lijnlast q_{II} van $5,0 \text{ kN/m}$ kan dragen.

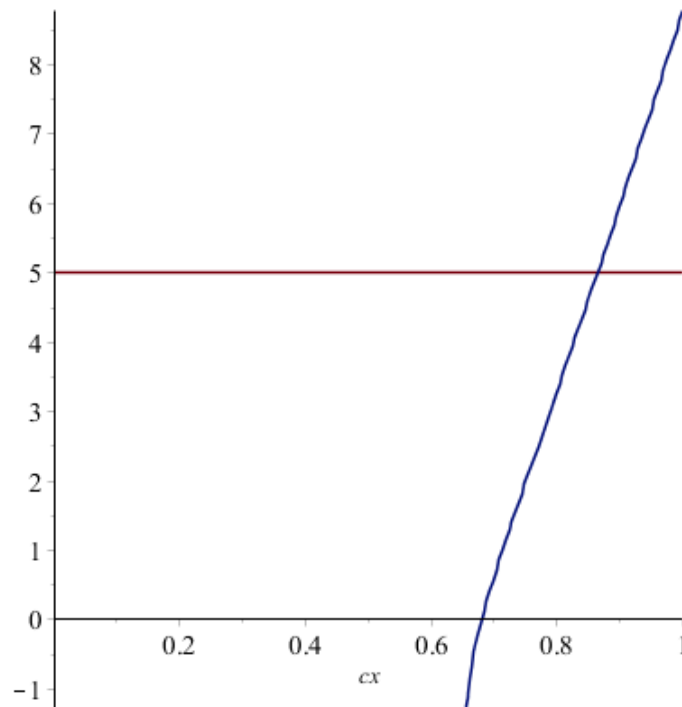
De variabele c_x (en c_y) zijn ingevoerd. c_x is een factor die de afname van de diameter van de wapening voorstelt doordat deze is gecorrodeerd. c_x geldt hier voor de hoofdwapening en c_y is de factor voor de verdeelwapening. Er is van uitgegaan dat de corrosie evenveel is in beide richtingen dus $c_x = c_y$.

cx zal een waarde hebben tussen de nul en één, bij een waarde van één is de volledige wapening nog effectief. Stel $cx = 0,9$ dan is 10% van de wapeningsdiameter gecorrodeerd. Met deze variabelen volgen respectievelijk de oppervlaktes voor de hoofdwapening en verdeelwapening:

$$A_{sx} = \frac{1}{4} * \pi * (cx * 6)^2 * \frac{1000}{100} \text{ in } \frac{mm^2}{m}$$

$$A_{sy} = \frac{1}{4} * \pi * (cy * 5)^2 * \frac{1000}{130} \text{ in } \frac{mm^2}{m}$$

Vervolgens worden, net als de vorige paragraaf, de formules opgesteld voor m_{xn} en m_{yn} , waaruit dan de waarde voor $q_{||}$ wordt gevonden. In dit geval bestaan de waarden voor $q_{||}$ en a_{min} alleen uit de onbekende variabele cx (cy is gelijk gesteld aan cx), dit betekent dat $q_{||}$ kan worden weergegeven met cx als enige onbekende. In figuur 2.4 is de plot hiervan weergegeven waarbij $q_{||}$ op de y-as staat met als drempelwaarde 5,0 kN/m (de rode lijn), de variabele cx staat op de x-as weergegeven van nul tot één.



Figuur 2.4 Plot voor $q_{||}$ met cx als variabele.

Met behulp van *Maple 18* is de plot verkregen en is de formule voor $q_{||} = 5,0$ kN/m opgelost, dit geeft de oplossing voor het snijpunt van de twee lijnen. In dit punt geldt $cx = 0,864$, hierbij voldoet de maatgevende lijnlast nog aan de 5,0 kN/m. Dit betekent dat de diameter van de wapening met 13,6% kan afnemen om nog te voldoen aan deze eis (dit komt overeen met een afname van 25,7% van het oppervlak). De diameter voor de hoofdwapening moet minimaal $D_x = 5,2$ mm zijn en voor de verdeelwapening $D_y = 4,3$ mm.

In bijlage 6 is de input van Maple en de formule voor $q_{||}$ in te zien.

2.4 LimitState:SLAB

Er wordt gebruik gemaakt van het programma *LimitState:SLAB 2.0 (Academic edition)*, dit programma kan vloeilijn analyses uitvoeren op betonplaten. Het berekent, in de UGT, het maatgevende mechanisme uit en geeft hierbij een bepaalde adequaatheid op bezwijken (12).

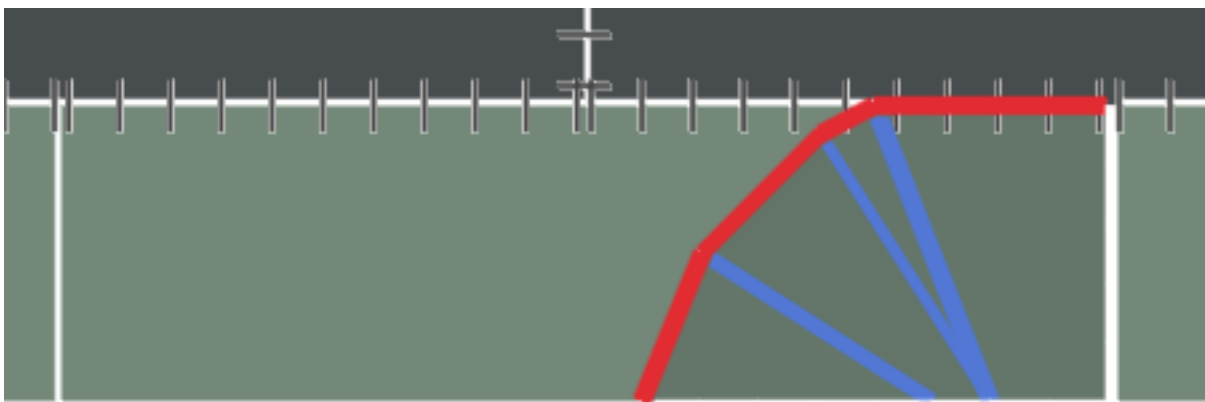
Bij een analyse geeft LimitState een vloeilijnen patroon weer met een *Adequacy factor* dat bij de opgegeven belastingen zal voorkomen. Het vloeilijnen patroon is hierin het maatgevende patroon, de *Adequacy factor* die daarbij wordt gegeven is de factor waarmee de gespecificeerde belastingen (permanent en variabel) moeten worden vermenigvuldigt voor het falen van de constructie.

Een deel van de Antillenflat is gemodelleerd op zo'n manier zodat het model representatief is voor de uitkragende galerijplaten. In bijlage 7 staat hier meer informatie over.

Van de belastingen die gesimuleerd worden is de enige variabele belasting de lijnlast q_{II} , deze lijnlast van 1 meter is op verschillende locaties op de galerijplaat (aan de rand) geanalyseerd. Op de locatie die maatgevend is zal de *Adequacy factor* de laagste waarde hebben. Uit verschillende simulaties volgt dat dit de locatie is waarbij de lijnlast q_{II} aangrijpt op de hoek van de galerijplaat (de hoek van een aanwezige voeg geldt ook), dit verifieert de bevindingen van paragraaf 2.2.

Vervolgens is de waarde van de lijnlast verhoogt naar de gevonden waarde van $q_{II} = 8,79 \text{ kN/m}$. Als q_{II} aangrijpt bij een hoek van een galerijplaat is de *Adequacy factor* 0,94. De factor is lager dan 1, dat betekent dat de belastingen te hoog zijn voor de galerijplaten en de waarde van $q_{II} = 8,79 \text{ kN/m}$ niet de laagste waarde is.

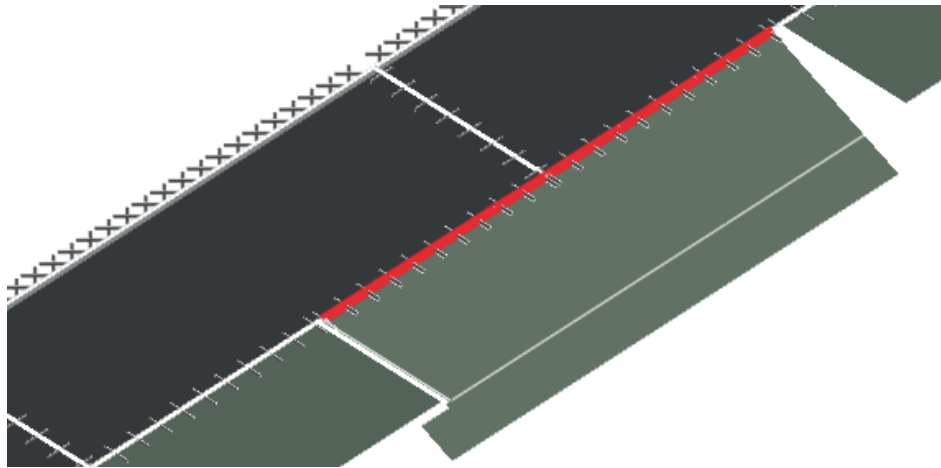
Bij $q_{II} = 7,86 \text{ kN/m}$ volgt een precieze *Adequacy factor* van 1. In figuur 2.5 is het vloeilijnen patroon hiervan weer gegeven. Dit is de laagste waarde die wordt gevonden voor q_{II} waarbij de constructie de minimale *Adequacy factor* van 1 heeft. Dit betekent dat het vloeilijnen patroon van figuur 2.5 het maatgevende bezwijkmechanisme is voor de galerijplaten. Hoewel het voorgestelde patroon uit paragraaf 2.2 deels overeenkomt, is het voorgestelde patroon niet accuraat genoeg wat het incorrect maakt.



Figuur 2.5 Maatgevend vloeilijnen patroon bij bezwijken van de galerijplaat.

Er is ook gekeken naar de afname van de wapening door corrosie. Hiervoor zijn de momenten m_{x_n} en m_{y_n} opnieuw berekend op dezelfde wijze als bij paragraaf 2.3 en ingevoerd in LimitState. Er zijn nieuwe simulaties gedaan tot dat een *Adequacy factor* van 1 is gevonden. Hieruit is gebleken dat de diameter van de wapening maximaal met 8,6% mag zijn afgenomen ($c_x = 0,9243$). De opneembare momenten zijn dan zodanig lager dat er bij een q_{II} last van 5,0 kN/m een *Adequacy factor* van 1 wordt gevonden.

Het vloeilijnen patroon wat daarbij ontstaat is in figuur 2.6 weer gegeven, hierbij is de gehele galerijplaat afgebroken langs de voegen. Figuur 2.7 geeft de werkelijke instorting weer van de galerijplaat van de negende verdieping van de Antillenflat, zoals hierin is te zien is de gehele plaat langs de voegen naar beneden gekomen net als in het model van LimitState. In bijlage 7 staat meer informatie over het model in LimitState.



Figuur 2.6 Vloeilijnen patroon nadat de wapening is gecorrodeerd.



Figuur 2.7 Ingestorte galerijplaat van de Antillenflat.

Er kan geconcludeerd worden dat de galerijplaten voldoen volgens de NEN-EN 1991-1-1 norm, mits er geen corrosie is opgetreden bij de wapening. Om te voldoen aan de eis dat er een lijnlast van 1 meter $q_{II} = 5,0$ kN/m gedragen kan worden, mag de wapening maximaal voor 8,6% zijn gecorrodeerd.

Deze afname van 8,6% van de diameter wordt als maatgevend aangenomen en niet de 13,6% die eerder was gevonden. Die waarde is gevonden bij het mechanisme dat is voorgesteld in de CUR-Publicatie(1), hierbij blijkt de locatie voor de lijnlast q_{II} te kloppen maar het bijbehorende mechanisme niet. Het maatgevende mechanisme voor de galerijplaat is die van figuur 2.5. De diameter voor de hoofdwapening moet minimaal $D_x = 5,55$ mm zijn en voor de verdeelwapening $D_y = 4,62$ mm.

3. Momentenverdeling

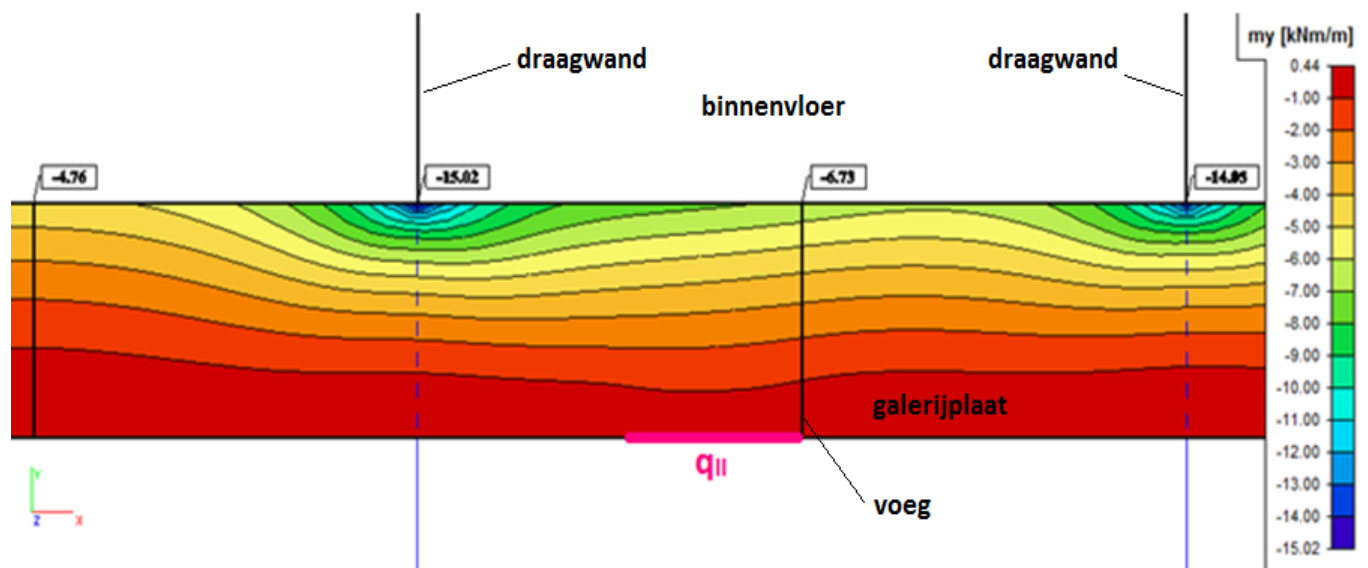
De galerijplaten voldoen aan de normen voor de belastingen die zijn opgesteld volgens de NEN-EN 1991-1-1. Mits er niet te veel corrosie is opgetreden aan de wapening kunnen de belastingen zonder falen worden afgedragen aan de funderingen van de Antillenflat. In paragraaf 1.3 is de constructie van de uitkragende galerijplaten beschreven, deze zitten vast gelegen aan de binnenliggende vloer met om de 4,5 meter een draagwand.

De galerijplaat zal een stijvere verbinding hebben met de vloer rondom de draagwand; dit betekent dat er in de zogenaamde “wandzone” meer moment tot zich zal trekken. In dit hoofdstuk wordt er gekeken naar de momentenverdeling van de uitkragende galerijplaten.

3.1 Scia-model

Met het programma Scia Engineer 15.3.120- student version is een deel van de Antillenflat gemodelleerd. Met Scia worden spanningen en momenten berekend in het beton. Er is hier slechts een gedeelte van de hele flat gemodelleerd en hetgeen wat van belang is, is hoe de momentenverdeling op de uitkragende plaat zal zijn. Het model is zo gemaakt dat de belastingen op de galerijplaten naar de vloer en draagwanden worden afgedragen. De vloer is verbonden aan de draagwanden die vervolgens onderin zijn gemodelleerd als lijnopleggingen en functioneren als de fundering. In bijlage 8 kan meer informatie over het model gevonden worden.

De belastingen zijn als de verbouw-combinatie ingevoerd met $\gamma_G = 1.15$ en $\gamma_Q = 1.30$. De locatie voor de lijnlast q_{II} , met een waarde van 5,0 kN/m, is op de maatgevende locatie naast een voeg van de galerijplaat. Scia berekent voor de belastingen de momenten in de galerijplaten. In figuur 3.1 is deze momentenverdeling weer gegeven voor een stuk van het model. De figuur geeft een bovenaanzicht weer voor een deel van het model, de “gekleurde” delen zijn de uitkragende betonnen platen. Deze platen zitten ingeklemd aan de binnenvloer met een draagwand om de 4,5 meter.

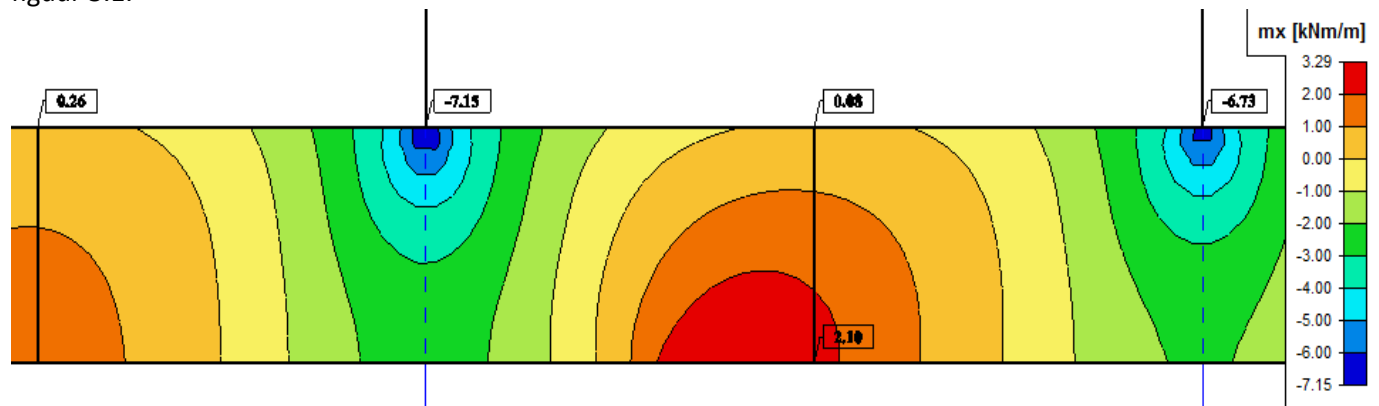


Figuur 3.1 Bovenaanzicht van de momentenverdeling in de y-richting van de galerijplaten.

Figuur 3.1 geeft de momenten in de y-richting weer, in het model is dit het moment dat wordt opgenomen door de hoofdwapening. De momenten in de x-richting zullen invloed hebben op de verdeelwapening.

Uit de figuur is meteen te zien dat de momentenverdeling niet uniform is over de lengte van de galerijplaat. Op de plekken waar de draagwanden zich bevinden zijn veel hogere momenten af te lezen. Door de hogere stijfheid van de inklemming op deze plek is het moment minstens twee keer zo groot dan halverwege de woning. Het hoogste moment is in het midden van de wandzone, hier treedt een moment van 15,02 kNm/m op. In het midden tussen twee draagwanden is het moment 6,73 kNm/m.

Figuur 3.2 geeft de momentenverdeling in de x-richting weer, het gaat hier om dezelfde galerijplaten uit figuur 3.1.



Figuur 3.2 Momentenverdeling in de x-richting van de galerijplaten.

De waarde van de momenten uit figuur 3.2 zullen worden opgevangen door de verdeelwapening. Ook in deze momentenverdeling is te zien dat de waarden van de momenten bij de wandzones een stuk hoger liggen. Het hoogste moment in de x-richting treedt ook op in het midden van de wandzone en heeft een waarde van 7,15 kNm/m. Op de plek van de lijnlast q_{II} hebben de momenten de tegenover gestelde richting met een maximum moment van 3,29 kNm/m.

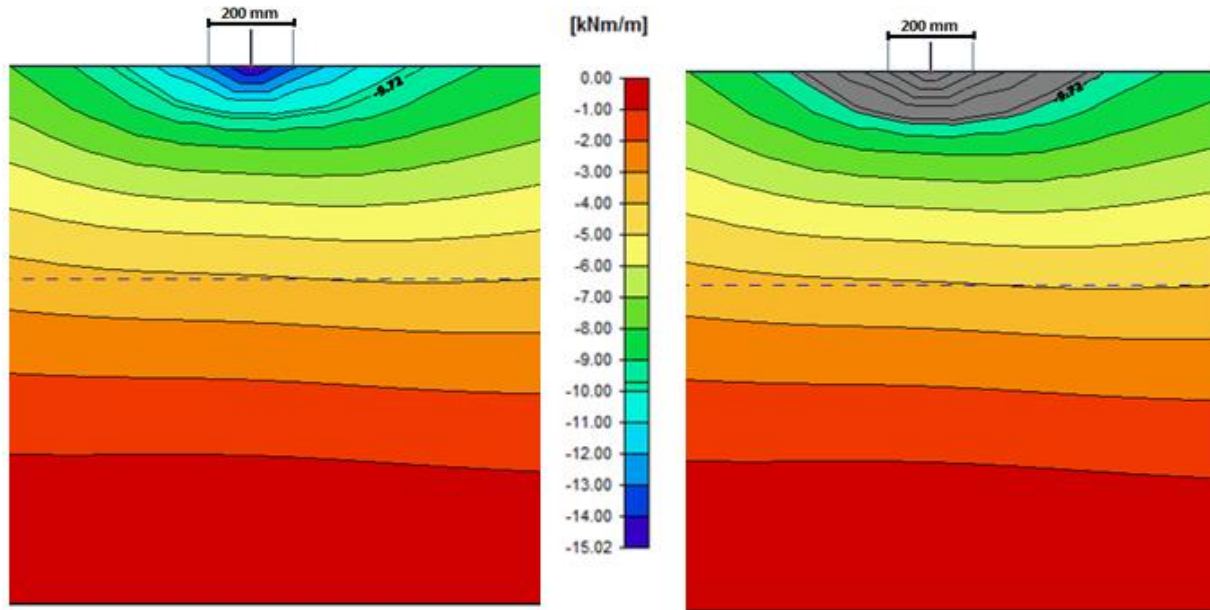
3.2 Vloeien van de wapening

De momenten, die optreden volgens het model, zijn in delen van de galerijplaten hoger dan de opneembare momenten ervan. Eerder is er vastgesteld dat de hoofdwapening een moment van 9,72 kNm/m kan opnemen en de verdeelwapening een moment van 4,98 kNm/m.

Als dit moment wordt bereikt betekent dat de plaat al aan zijn uiterste plastische momentopname zit en dat de wapening zijn vloeispanning van $417,4 \text{ N/mm}^2$ heeft bereikt.

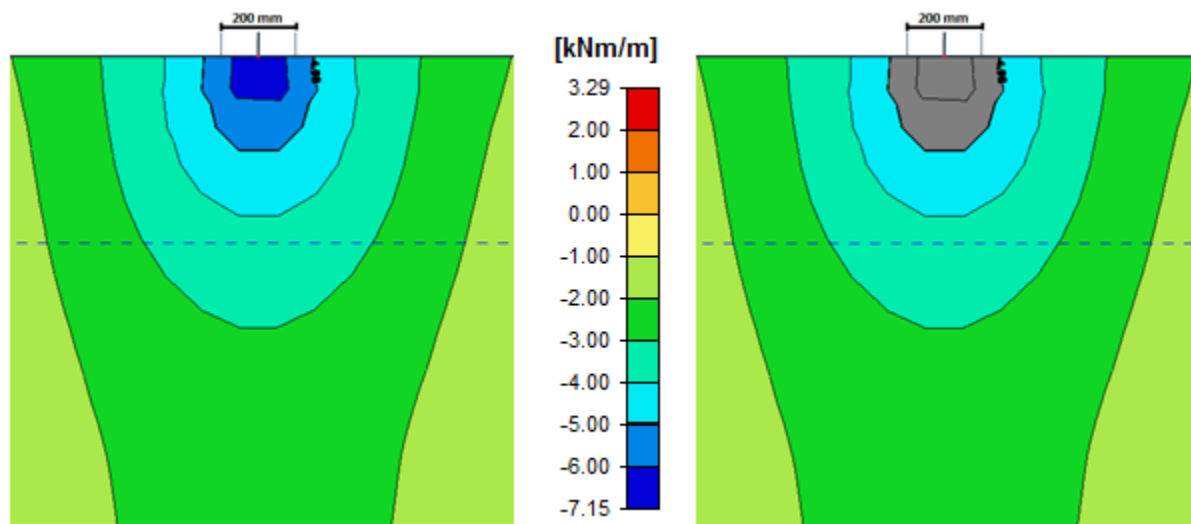
In figuur 3.1 is te zien dat er in een gedeelte van de galerijplaat momenten optreden die groter zijn dan 9,72 kNm/m (in de y-richting). In deze gebieden is de wapening al aan het vloeien en kan niet het volledige moment, dat optreedt, worden afgedragen aan de inklemming. Deze momenten zullen worden herverdeeld naar de nabijgelegen wapening. Figuur 3.3 en 3.4 geven de gebieden aan waar er vloeïng in de wapening is.

In de onderstaande figuren is er dichterbij de wandzone, rondom de 200 mm dikke draagwand, gekeken waarbij de hogere momenten optreden. Figuur 3.3 geeft rechts het gebied aan waarin de hoofdwapening ($\phi 6-100\text{mm}$) al vloeit bij de belastingen die optreden. Het moment, wat in deze zone niet meer op te nemen is, zal worden herverdeeld naar de nabij gelegen wapening en hierdoor zal de spanning in de rondom gelegen wapening toe nemen waardoor daar ook de vloeispanning bereikt kan worden. De werkelijke zone waar de wapening al vloeit zal daarom een groter oppervlak hebben dan het grijze deel uit de figuur.



Figuur 3.3 Links de momentenverdeling voor de hoofdwapening, rechts het gebied waar de wapening vloeit.

Figuur 3.4 geeft dezelfde wandzone weer, de momenten hebben hier de andere richting die de verdeelwapening ($\phi 5-130\text{mm}$) opneemt. Het vloeigebied komt overeen en is voornamelijk gelegen bij de draagwand.



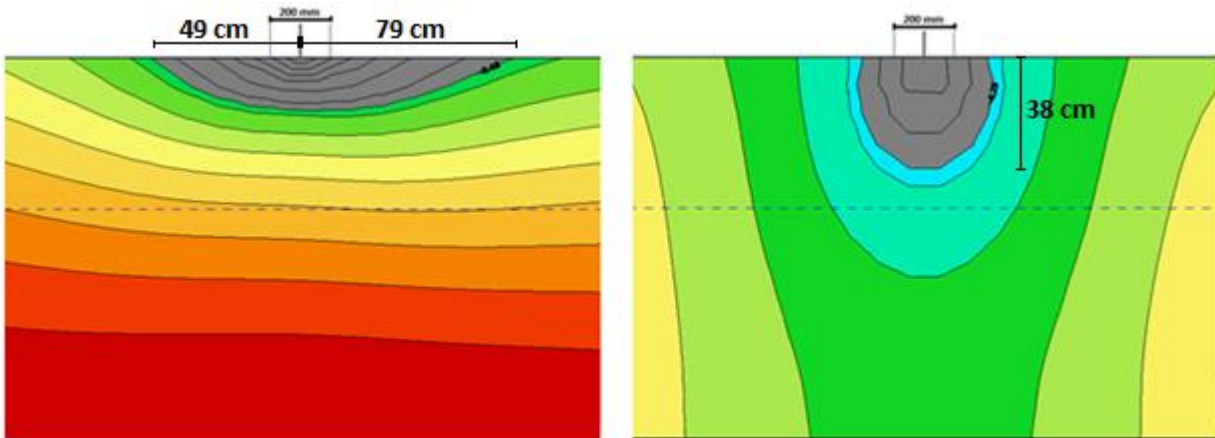
Figuur 3.4 Links de momentenverdeling voor de verdeelwapening, rechts het gebied waar de wapening vloeit.

Met de vloeilijnen theorie is er geconstateerd dat de wapening gecorrodeerd mag zijn tot een maximale afname van 8,6% van de diameter. Hierbij zal de effectieve hoofdwapening een diameter van 5,55 mm hebben en de verdeelwapening 4,62 mm. Tabel 3.1 geeft de grote van de diameter weer met de bijbehorende maximale momentopname (bezwijkmoment) van de wapening.

Tabel 3.1 Bezwijkmomenten wapening voor en na corrosie.

	Hoofdwapening		Verdeelwapening	
Diameter ϕ [mm]	6	5.55	5	4.62
Afname diameter	-	8.6%	-	8.6%
Oppervlak [mm ² /m]	282.7	241.6	151.0	129.0
Afname oppervlak	-	14.6%	-	14.6%
Bezwijkmoment [kNm/m]	9.72	8.40	4.98	4.29

Het is duidelijk dat er na het indringen van o.a. chloriden in het beton de wapening door corrosie zwakker wordt. De momentopnamen van de wapening in beide richtingen is lager met waarden van 8,40 kNm/m voor de hoofdwapening en 4,29 kNm/m voor de verdeelwapening. Dit heeft als gevolg dat er in de betonnen galerijplaten meer wapening aan het vloeien is. Figuur 3.5 laat zien dat het gedeelte waar vloeiing plaats vindt ongeveer drie keer zo groot is geworden als de wapening voor 8,6% is gecorrodeerd.



Figuur 3.5 Vloeingsgebied met 8.6% afname van de diameter. Links: hoofdwapening. Rechts: verdeelwapening.

Het vloeingsgebied van de hoofdwapening loopt over een breedte van $\pm 1,3$ meter. De lengte van de hoofdwapening die vloeit gaat tot 0,2 meter de galerijplaat in en van de verdeelwapening tot $\pm 0,4$ meter. De resterende momenten, van de grijze delen, die niet zijn opgenomen worden herverdeeld naar de nabijgelegen wapening, hierdoor zal meer wapening zijn vloeispanning bereiken. Dit heeft als gevolg dat de maten van de grijze delen zullen toenemen en zal het gebied dat geïnspecteerd moet worden groter zijn.

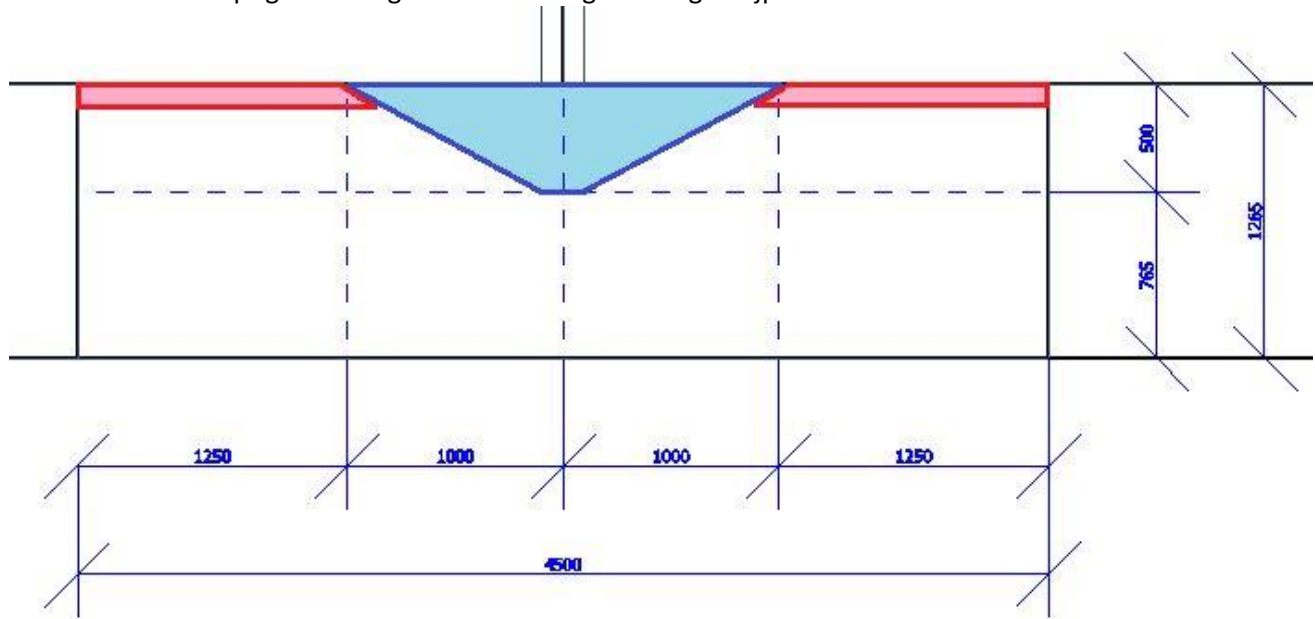
4. Controleren van de galerijplaten

Voor het controleren van de galerijplaten van de Antillenflat is het belangrijk om te weten waar het nodig is om de controles uit te voeren. In het geval van de galerijplaten van de Antillenflat is het niet nodig om de gehele uitkragende platen te controleren. Het is van belang dat de wapening voldoende is in de gebieden waar deze het zwaarst worden belast, dit is gebleken rond het gebied waar de platen zitten ingeklemd bij de draagwand in de buurt.

4.1 Controle zone

In figuur 4.1 is een bovenaanzicht van één van de galerijplaten te zien. De galerijplaat heeft een breedte van 4,5 meter en een uitkragende lengte van 1,265 meter, halverwege de inklemming aan de binnenvloer bevindt zich de scheidende draagwand tussen twee woningen in. De hoogste momenten in de galerijplaten treden op rondom de draagwand; hier zal de wapening al deels aan het vloeien zijn. Het is belangrijk dat er gecontroleerd wordt dat de wapening in die zone voldoende oppervlak heeft. Dit kan door het meten van de diameter door een ferrosan (paragraaf 4.2) uit te voeren.

Er zijn twee gebieden waarvan het belangrijk is dat deze worden gecontroleerd. Het eerste gedeelte is de blauwe zone gelegen bij de wand; deze loopt tot 1 meter aan beide kanten vanaf de draagwand en tot een halve meter de plaat in. Het tweede gebied is de rode zones gelegen aan de inklemming met de binnenvloer en loopt geheel langs de inklemming van de galerijplaat over een breedte van 10 cm.



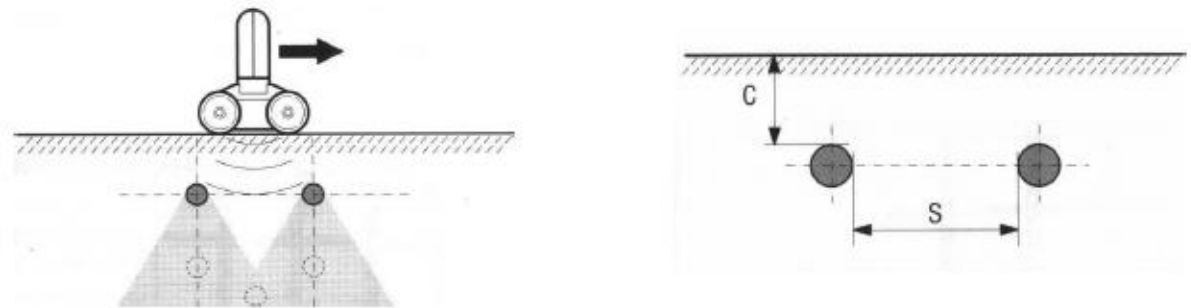
Figuur 4.1 Controle zones per galerijplaat van de Antillenflat.

In de blauw zone zal een deel van de plaat zijn maximale opneembare moment bereikt hebben; hier zal dus een deel van de wapening al aan het vloeien zijn. Dit geldt voor alle galerijplaten, als de lijnlast q_{II} niet aanwezig is op deze specifieke galerijplaat, ontstaan er alsnog momenten rondom de wandzone die hogere waarden hebben dan dat er opgenomen kan worden. De momentenverdeling hiervan is in bijlage 9 te zien.

In de rode zone is het erg belangrijk dat de wapening de minimale diameters heeft die eerder zijn gesteld. Als de wapening op deze locaties zal gaan vloeien zal het volledige vloeilijnenpatroon tot stand kunnen komen wat betekent dat de gehele galerijplaat zal bezwijken.

4.2 Ferroskan

Een manier om de wapening in betonconstructies op een niet-destructieve wijze te lokaliseren en te definiëren is door een ferroskan uit te voeren (3). Er wordt hierbij gebruik gemaakt van elektromagnetische signalen waardoor er in het wapeningsstaal wervelstromen ontstaan, deze beïnvloeden de inductiestroom door terugkoppeling. Hiermee kan de positie en diameter van de wapening worden afgeleid door de grootte van de terugkoppelinductiespanning.



Figuur 4.2 Ferroskan meet methode. Met behulp van elektromagnetische signalen kunnen de diameter ϕ , de dekking c en h.o.h. afstand s bepaald worden. (3)

De hoofdwapening is het meest maatgevend om te meten in het geval van de Antillenflat; de hoofdwapening heeft een diameter van 6 mm met een gemiddelde hart op hart afstand van 100 mm. Met behulp van de ferroskan kan er gecontroleerd worden in de controle zones van figuur 4.1 of hieraan wordt voldaan. Als de diameter minder dan 6 mm (of kleiner dan 5,33 mm door corrosie) is of de hart of hart afstand meer dan 100 mm zal men maatregelen moeten nemen.

4.3 Chloride concentratie

Het optreden van corrosie aan de wapening in de galerijplaat, die naar beneden is komen vallen, is gekomen doordat er chloriden zijn binnengedrongen in de betonnen platen. Het bedrijf Nebest heeft chloride metingen gedaan (3) en geconstateerd dat een chloride concentratie hoger dan 0,4 % m/m ten opzichte van het cementgewicht een reële kans geeft op corrosie aan de wapening. Hierop zullen de controlezones uit figuur 4.1 gecontroleerd moeten worden, bij een te zwaar corrosie proces zal de diameter zodanig zijn afgenomen dat de galerijplaten niet meer zullen voldoen aan de opgestelde normen.

4.4 Herstelmogelijkheden

In het geval, dat er uit controles blijkt dat een galerijplaat niet voldoet aan de minimale diameters van de wapening door constructiefouten of corrosie, zal men maatregelen moeten nemen. Er zijn meerdere herstellmogelijkheden om een galerijplaat weer veilig te stellen zodat deze voldoet aan de gestelde normen. Er staan hier enkele mogelijkheden kort beschreven, meer informatie is te vinden in het bachelor eindwerk van D.L. Klusener (10) op pagina 34.

Belasting verlagen.

De afwerklaag op de galerijplaten kan worden verminderd en deze is dikker gemaakt dan het originele ontwerp. Door een deel ervan te verwijderen wordt de permanente belasting verminderd.

Tweede draagweg.

Een snelle manier in het geval van een onveilige situatie is het aanbrengen van een tweede draagweg. Een buizenconstructie kan worden toegepast aan de uitkragende zijde, die een draagweg creëert naar de betonnen draagmuur op begane grond.

Constructie verstevigen.

De galerijplaat kan worden verstevigd door een extra soort wapening in te brengen. Een koolstofwapening kan worden ingebracht door te boren in de plaat en koolstof in te brengen vervolgt door epoxy om het koolstof te hechten aan het beton.

Dwarskrachtenkoppeling.

Een stalen strip wordt aangebracht die de galerijplaten onderling verbindt bij het uitkragende einde. Hiermee kan er een herverdeling van de krachten plaatsvinden.

Conclusie

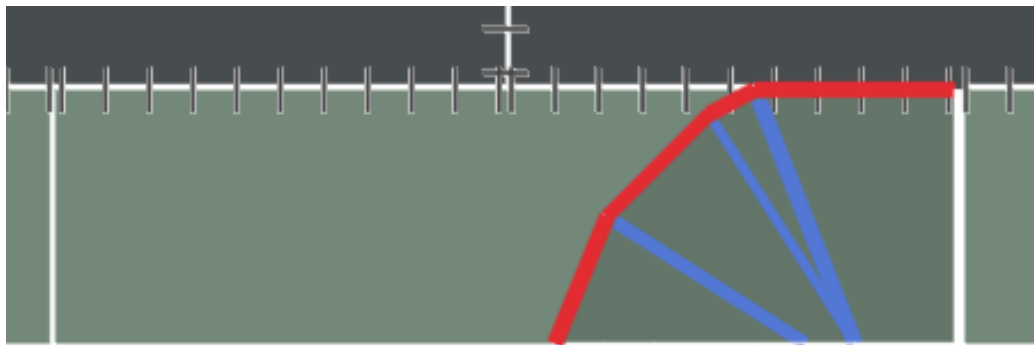
Een galerijplaat van de Antillenflat is in Leeuwarden mei 2011 bezweken; dit is 46 jaar nadat de flat was opgeleverd. Dit is gekomen doordat de wapening in de betonnen plaat te veel was aangetast door corrosie. Dit had als gevolg dat het effectieve oppervlak van het wapeningsstaal zodanig was afgenomen dat de optredende momenten te hoog werden hetgeen de galerijplaat deed bezwijken. Naar aanleiding hiervan is dit onderzoek gedaan om te kijken of de overige galerijplaten nog veilig zijn.

De maatgevende lijnlast q_{II} waar naar gezocht wordt volgt, uit de normen van het NEN8701. Buiten de permanente belasting en de variabele verdeelde belasting voldoet een galerijplaat als deze hierbij een lijnlast van 5,0 kN/m kan dragen over een lengte van 1 meter aan de vrije rand van de plaat. Uit deze norm volgt ook dat er gerekend wordt met het 'verbouwniveau' hetgeen inhoudt dat de permanente belasting een factor $\gamma_G = 1.15$ heeft en de variabele belastingen een factor $\gamma_Q = 1.30$.

Voordat de hoofdvraag wordt beantwoord, zal er gekeken worden naar de subvragen.

Welk bezwijkmechanisme treedt er op bij de maatgevende belastingen?

Met behulp van de vloeilijnen theorie en LimitState is er gezocht naar de maatgevende positie voor de lijnlast q_{II} . Zowel uit de theorie als uit LimitState volgt dat de maatgevende positie van de lijnlast aangrijpt op een hoek of een voeg van een galerijplaat. Het mechanisme dat is voorgesteld als maatgevend in de *CUR-Publicatie 248, 2e herziene uitgave, 'Constructieve veiligheid van uitkragende galerijplaten'* blijkt niet correct te zijn. De lijnlast die hierbij wordt gevonden geeft niet de laagste waarde en maakt dat het voorgestelde vloeilijnen patroon incorrect is. Het maatgevende vloeilijnen patroon treedt op bij $q_{II} = 7,87$ kN/m. Het bezwijkmechanisme dat daarbij optreedt staat in de afbeelding hieronder weer gegeven.



Het bezwijkmechanisme/vloeilijnenpatroon dat optreedt bij de maatgevende belastingen.

In het geval van een afname van de wapening zal er een bezwijkmechanisme ontstaan, waarbij de gehele galerijplaat bezwijkt. Het vloeilijnen patroon loopt geheel langs de inklemming. Bij de instorting van de galerijplaat mei 2011 is dit het geval geweest.

Hoeveel wapening is er nodig om de veiligheid te waarborgen?

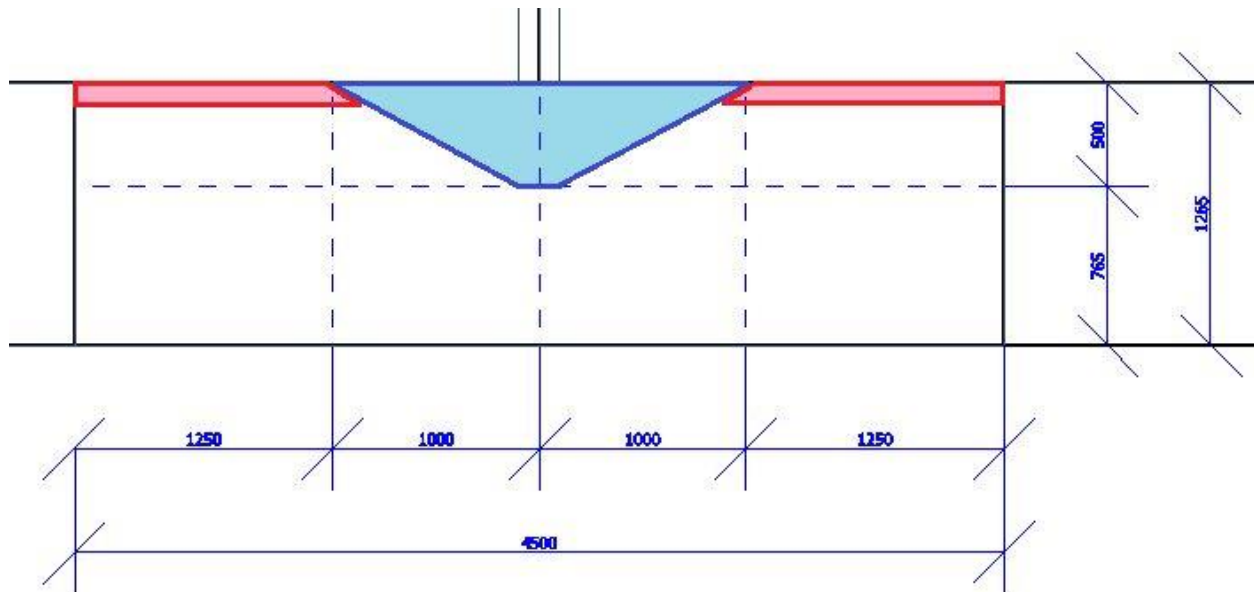
Met een hoofdwapening van $\phi 6-100$ mm en een verdeelwapening $\phi 5-130$ mm kan de lijnlast q_{II} oplopen tot 7,86 kN/m voordat het bezwijkmechanisme optreedt. De norm is dat de galerijplaat een lijnlast q_{II} van 5,0 kN/m kan dragen; in de ideale staat voldoet de huidige wapening aan de norm.

Doordat er corrosie is opgetreden in delen van de Antillenflat, is de effectieve diameter afgenomen. De diameter van het wapeningsstaal mag maximaal met 8,6% zijn afgenomen om te voldoen aan de lijnlast q_{II} met een grote van 5,0 kN/m. De diameter van de hoofdwapening moet daarmee minimaal 5,55 mm zijn en van de verdeelwapening minimaal 4,62 mm.

Waar moeten inspecties worden uitgevoerd om de wapening te controleren?

Het is belangrijk dat de wapening wordt gecontroleerd in de kritische zones van de galerijplaten. Uit de momentenverdeling blijkt dit te zijn bij de locatie waar de plaat is ingeklemd bij de draagwand, die de woningen scheidt. In dit gebied zal een deel van de wapening al aan het vloeien zijn hetgeen betekent dat het bezwijkmechanisme al deels tot stand gekomen is. De wapening die zijn vloeispanning heeft bereikt kan geen moment meer opnemen. Het overige moment wordt herverdeeld naar de nabij gelegen wapening dat als gevolg kan hebben dat deze wapening ook zijn vloeispanning kan bereiken. Wanneer het volledige maatgevende vloeilijnenpatroon is bereikt, doordat de wapening daar is gaan vloeien, zal de galerijplaat bezwijken.

Bij het controleren van de galerijplaten is het belangrijk dat de kritische gebieden, waar de hoogste momenten optreden en het vloeilijnen patroon loopt, goed worden onderzocht. De delen van de galerijplaten, die belangrijk zijn om te inspecteren, zijn te zien in de onderstaande afbeelding. Het blauwe gebied is het deel dat zich bij de draagwand bevindt en hier zal de wapening deels aan het vloeien zijn. Het rode gebied zijn de delen waar geen vloeïng mag optreden; wanneer de wapening hier gaat vloeien zal het gehele bezwijkmechanisme kunnen ontstaan wat de galerijplaat onveilig maakt. Met behulp van een ferroscaan kunnen deze zones worden geïnspecteerd en als de wapening niet voldoet aan de eisen, zullen er maatregelen moeten worden genomen.



Een bovenaanzicht van een galerijplaat, in de blauwe en rode delen is het belangrijk is dat de wapening voldoende is.

Met de antwoorden op de subvragen kan de hoofdvraag van het onderzoek worden beantwoord.

'In hoeverre zijn de galerijplaten van de Antillenflat veilig bij het optreden van de maatgevende belastingen?'

De galerijplaten van de Antillenflat zijn veilig bij het optreden van de belastingen, waarbij de lijnlast $q_{||}$ op de maatgevende positie optreedt. Het is de norm dat de galerijplaat naast de permanente belastingen en variabele verdeelde belasting een lijnlast van 5,0 kN/m kan dragen. In ideale staat kunnen de galerijplaten een lijnlast van 7,86 kN/m aan en voldoen daarmee aan de norm.

De locatie van de lijnlast $q_{||}$, die is aangegeven in de publicatie *CUR-Publicatie 248, 2e herziene uitgave, 'Constructieve veiligheid van uitkragende galerijplaten' (1)*, klopt. Echter is het geschematiseerde vloeilijnen patroon wat hierbij wordt gemeld niet het maatgevende vloeilijnen patroon. Het verschil voor de laagste waarde van de lijnlast tussen het voorgestelde mechanisme en het maatgevende bezwijkmechanisme is 0,93 kN/m. Dit is een significant verschil wat niet zomaar verwaarloosd kan worden en dit betekent dat het voorgestelde mechanisme incorrect is.

Echter dit is alleen het geval als de galerijplaten van de Antillenflat in ideale staat verkeren, dit is helaas niet het geval voor de gehele flat. Doordat er corrosie is opgetreden in delen van de Antillenflat, is de effectieve diameter verminderd. De diameter van het wapeningsstaal mag maximaal met 8,6% zijn afgenomen om te voldoen aan de lijnlast $q_{||}$ met een grote van 5,0 kN/m. De hoofdwapening moet daarmee minimaal 5,55 mm zijn en de verdeelwapening 4,62 mm.

Het vaststellen van de veiligheid van de Antillenflat kan door inspecties uit te voeren op de kritische zones van de galerijplaten.

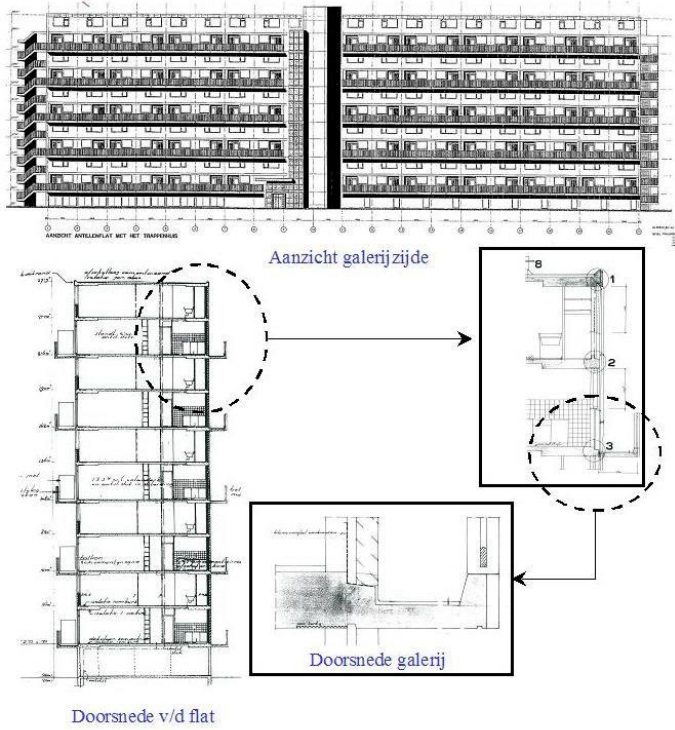
De galerijplaten van de Antillenflat zijn dus veilig zolang de wapening voldoende is in de kritische zones. Doordat er corrosie is opgetreden, is de hoeveelheid van de effectieve wapening afgenomen. Wanneer deze afname van de diameter van de wapening minder dan 8,6% is, dan zijn de galerijplaten van de Antillenflat veilig.

Bronvermelding

1. CUR-Publicatie 248, 2e herziene uitgave, 'Constructieve veiligheid van uitkragende galerijplaten'. Rotterdam : SBRCURnet en Platform Constructieve Veiligheid, 2014
2. Ir. W.G. Meilink, *Onderzoeksrapportage Econstruct Antillenflat Leeuwarden*. Leeuwarden: Ingenieursbureau Econstruct, 2011
3. Ir. C.J.C. Rademaker, H.N.G. Adema. *Onderzoeksrapportage Econstruct Antillenflat Leeuwarden. Bijlage 2 Rapportage Nebest*. Groot-Amers : Nebest Adviesgroep, 2011
4. D.G. Mans, *Onderzoeksrapportage Econstruct Antillenflat Leeuwarden. Bijlage 11 Analyse instorting galerij*. Leeuwarden: Econstruct, 2011
5. Ing. Tj. Tasma, *Onderzoeksrapportage Econstruct Antillenflat Leeuwarden. Bijlage 3 controle berekening Econstruct*. Leeuwarden : Ingenieursbureau Econstruct, 2011
6. Nederlands Normalisatie Instituut (NEN). *NEN 8701: 2011 nl - Beoordeling van de constructieve veiligheid van een bestaand bouwwerk bij verbouwen en afkeuren - Belastingen*. NEN. 2011.
7. Nederlands Normalisatie Instituut (NEN). *NEN-EN 1992-1-1+C2 - Eurocode 2: Ontwerp en berekening van Betonconstructies - Deel 1-1: algemene regels en regels voor gebouwen*. NEN, 2011.
8. Ir. A.C.W.M. Vrouwenvelder, Ir. J. Witteveen, *Plasticity CT4150 The plastic behaviour and the calculation of plates subjected to bending*. Delft: TU Delft Faculteit van Civiele Techniek en Geotechniek, 2003
9. MSc G. Kennedy, BSc C.H. Goodchild, *Practical Yield Line Design*. Camberly: The Concrete Centre, 2004
10. D.L. Klusener, *Uitkragende betonplaten Bezwijken en schade aan betonnen uitkragende galerijplaten en balkons*. Delft: TU Delft Faculteit Civiele Techniek, 2015
11. Ir. P.A. de Vries, Dr.ir. S.A.A.M. Fennis. *Betonconstructies*. Delft : TU Delft, 2013
12. LimitState Ltd The Innovation Centre. *Limitstate: SLAB Manual*. Sheffield: LimitState Ltd, 2015

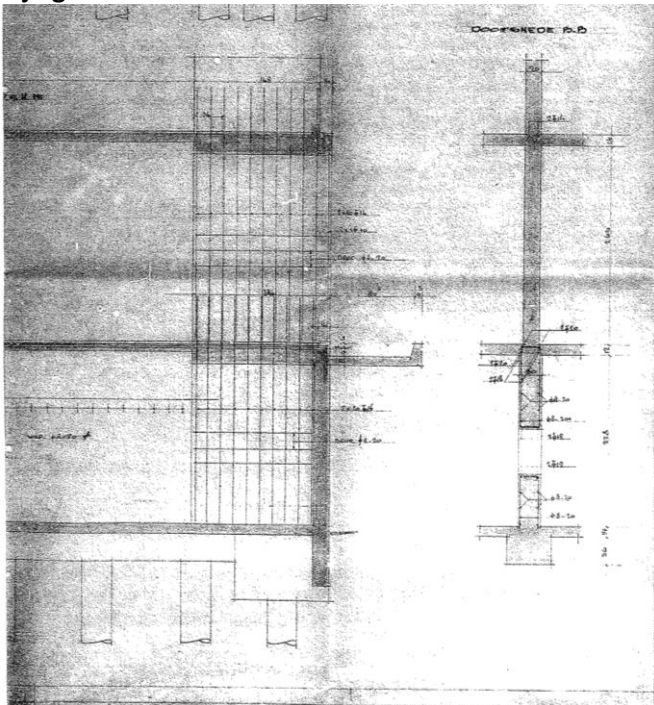
Bijlage

Bijlage 1



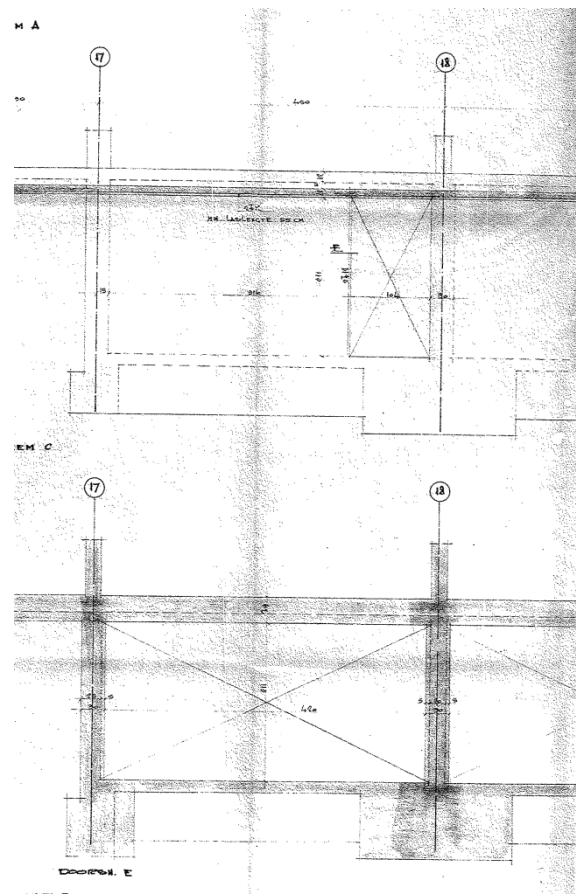
Bijlage 1 Overzicht Antillenflat en een doorsnede van de flat

Bijlage 2



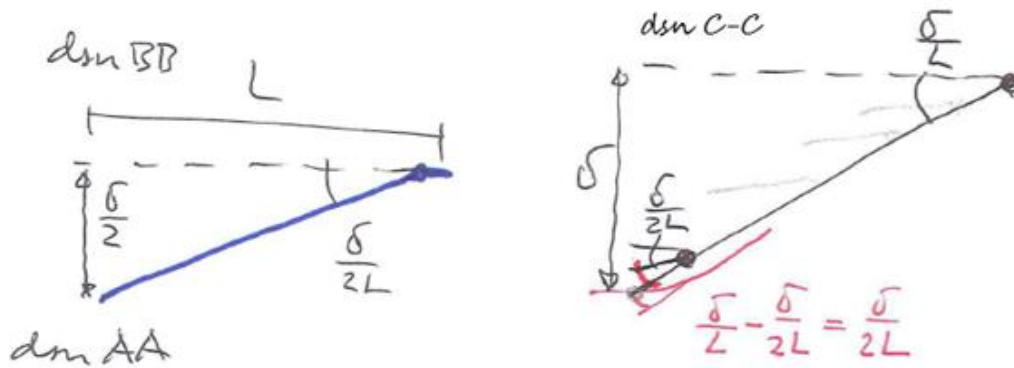
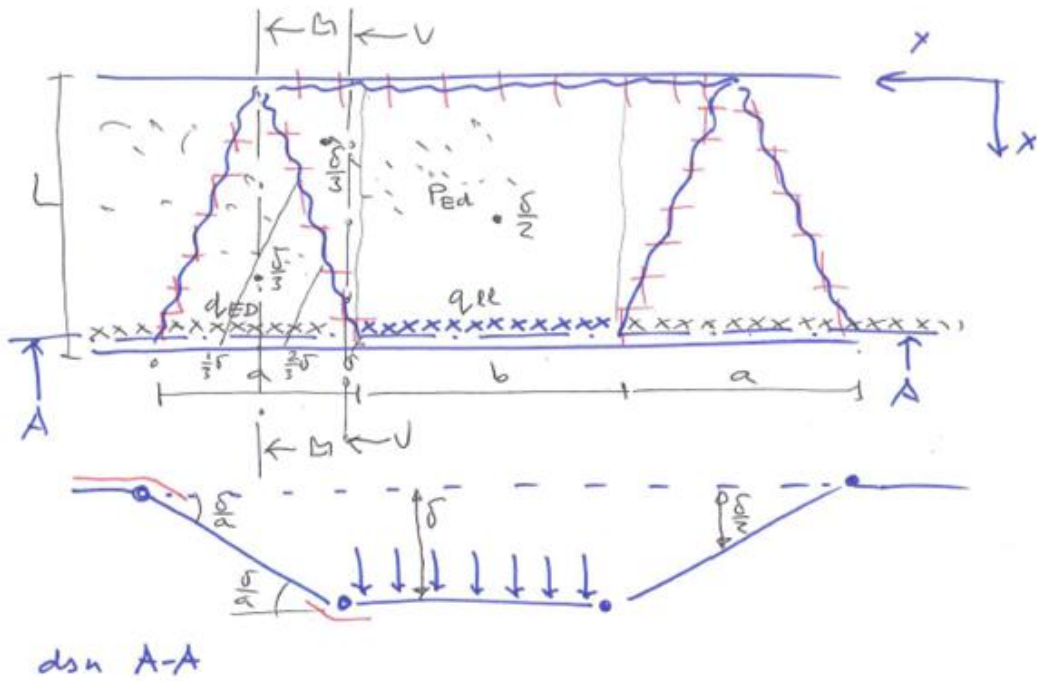
Bijlage 2 Ontwerptekening galerijzijde

Bijlage 3

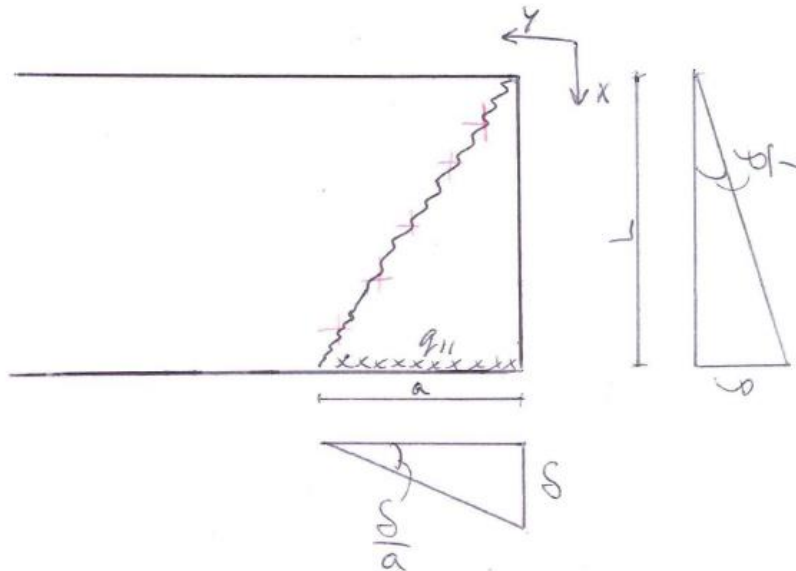


Bijlage 3 Ontwerptekening woningsscheidende wanden

Bijlage 4



Bijlage 4 Tweede vloeilijnenpatroon, lijnlast q_{II} langs het midden van de galerijplaat.



Bijlage 4 Derde vloeilijnenpatroon, scheur volledig in de hoek van een galerijplaat.

Bijlage 5

Formules voor het tweede vloeilijnenpatroon gelegen midden in langs de galerijplaat (eerste patroon uit bijlage 9).

Uitwendige arbeid:

$$Au := b q_{ll} d + b q_{ed} d + a q_{ed} d + \frac{1}{2} a L p_{ed} d + \frac{1}{2} L b p_{ed} d$$

Inwendige arbeid:

$$Ai := \frac{2 m_{yn} L d}{a} + \frac{1}{2} \frac{m_{xn} a d}{L} + \frac{m_{xn} (a + b) d}{L}$$

q_{ll} met a als enige variabele:

$$q_{lla} := -\frac{1}{2} \frac{L^2 a^2 p_{ed} + L^2 a b p_{ed} + 2 L a^2 q_{ed} + 2 L a b q_{ed} - 4 L^2 m_{yn} - 3 a^2 m_{xn} - 2 a b m_{xn}}{a L b}$$

Met de laagste waarde voor a :

$$a_{min} := -\frac{2 \sqrt{-(L^2 p_{ed} + 2 L q_{ed} - 3 m_{xn}) m_{yn} L}}{L^2 p_{ed} + 2 L q_{ed} - 3 m_{xn}}$$

$a_{min} = 1,41$ meter en hieruit volgt $q_{ll} = 15,66$ kN/m

Formules voor het vloeilijnenpatroon in de hoek van de galerijplaat (tweede patroon uit bijlage 9).

Uitwendige arbeid:

$$Au := \frac{1}{2} q_{ed} a d + \frac{1}{2} q_{lla} d + \frac{1}{3} a L p_{ed} d$$

Inwendige arbeid:

$$Ai := \frac{m_{yn} L d}{a} + \frac{m_{xn} a d}{L}$$

q_{ll} met a als enige variabele:

$$q_{lla} := -\frac{1}{3} \frac{2 L^2 a^2 p_{ed} + 3 L a^2 q_{ed} - 6 L^2 m_{yn} - 6 a^2 m_{xn}}{a^2 L}$$

$a_{min} = 1$ aangenomen aangezien dit de maximale waarde voor b is en hier geldt $a = b$. Dit geeft $q_{ll} = 16,39$ kN/m

De overige input is voor beide patronen als volgt:

$$p_{ed} = 3,77 * 1,15 + 2,0 * 1,3 = 6,94 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{ed} = 0,7 * 1,15 = 0,81 \text{ kN/m}$$

$$L = 1,265 \text{ m}$$

$$b = 1 \text{ m}$$

$$m_{xn} = 9,72 \text{ kNm}$$

$$m_{yn} = 4,98 \text{ kNm}$$

$$m_{xp} = m_{yp} = 0 \text{ kNm}$$

Bijlage 6

Hieronder is de input weer gegeven die in Maple 18 is gebruikt voor het vinden van de maximale corrosie factor cx .

```
> restart
> pi := evalf(Pi, 15) :
> cy := cx :
> fyd := 417.4 : fcd := 13.3 : b1 := 1000 :
> Asx :=  $\frac{1000}{100} \cdot \pi \cdot 0.25 \cdot (6 \cdot cx)^2$  : Nsx := Asx · fyd :
> dx :=  $130 - 40 - 0.5 \cdot (6 \cdot cx)$  : xu1 :=  $\frac{N_{sx}}{(0.75 \cdot fcd \cdot b1)}$  :
> mxn :=  $(dx - 0.39 \cdot xu1) \cdot N_{sx}$  :
> Asy :=  $\frac{1000}{130} \cdot \pi \cdot 0.25 \cdot (5 \cdot cy)^2$  : Nsy := Asy · fyd :
> dy :=  $130 - 40 - 6 - 0.5 \cdot (5 \cdot cy)$  : xu2 :=  $\frac{N_{sy}}{(0.75 \cdot fcd \cdot b1)}$  :
> myn :=  $(dy - 0.39 \cdot xu2) \cdot N_{sy}$  :
> Au :=  $ped \cdot \left( b \cdot L \cdot \frac{d}{2} + \frac{a \cdot L}{4} \cdot \frac{d}{3} + \frac{a \cdot L}{2} \cdot \frac{d}{3} \right) + qed \cdot \left( b \cdot d + \frac{a \cdot d}{2} \right) + qll \cdot b \cdot d$  :
> myp := 0 : mxp := 0 :
> Ai :=  $\left( b + \frac{a}{2} \right) \cdot mxn1 \cdot \left( \frac{d}{L} \right) + \frac{a}{2} \cdot (mxp + mxn1) \cdot \left( \frac{d}{2 \cdot L} \right) + L \cdot (myp + myn1) \cdot \left( \frac{d}{a} \right)$  :
> qlla := solve(Ai = Au, qll) :
> dqlla := diff(qlla, a) :
> amin := solve(dqlla = 0, a) :
> L := 1.265 : ped :=  $(2 \cdot 1.3 + 1.15 \cdot 3.77)$  : qed :=  $0.7 \cdot 1.15$  : b := 1 : mxn1 :=  $mxn \cdot 10^{-6}$  :
    myn1 :=  $myn \cdot 10^{-6}$  :
> qllareal :=  $\frac{qlla}{1.3}$  ;
```

$$qllareal := - \frac{0.152 (13.0 a^2 + 26.0 a - 0.400 (84 - 2.5 cx - 2.46 cx^2) cx^2 - 0.354 a^2 (90 - 3.0 cx - 4.60 cx^2) cx^2 - 0.472 a (90 - 3.0 cx - 4.60 cx^2) cx^2)}{a}$$

```
> a := max(amin);
```

$$a := \max \left(- \frac{2.52 \sqrt{-0.0630 (13.0 - 0.354 (90 - 3.0 cx - 4.60 cx^2) cx^2) (84 - 2.5 cx - 2.46 cx^2) cx^2}}{13.0 - 0.354 (90 - 3.0 cx - 4.60 cx^2) cx^2}, \frac{2.52 \sqrt{-0.0630 (13.0 - 0.354 (90 - 3.0 cx - 4.60 cx^2) cx^2) (84 - 2.5 cx - 2.46 cx^2) cx^2}}{13.0 - 0.354 (90 - 3.0 cx - 4.60 cx^2) cx^2} \right)$$

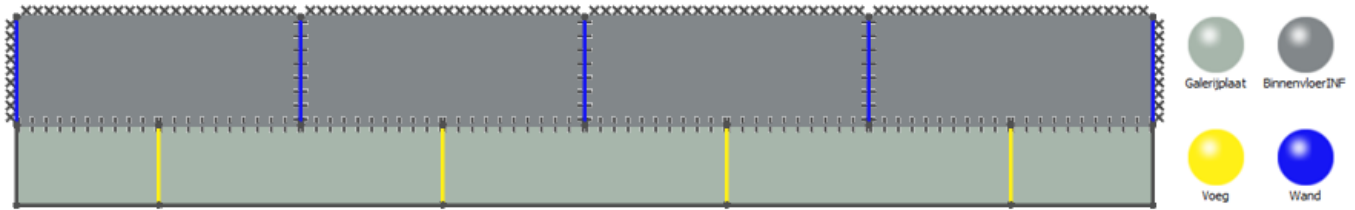
```
> solve(qllareal = 5, cx);
```

```
-0.835, 0.860, 4.04
```

Doordat er geldt dat $0 \leq cx \leq 1$ volgt eruit dat $cx = 0,860$ (afgerond). De precieze waarde is $cx = 0,8641$.

Bijlage 7

In deze bijlage staan de figuren en waarden die bij LimitState: SLAB zijn gevonden. Het model wat een deel van de galerijplaat simuleert.



Het onderste deel in het model stelt de uitkragende betonnen galerijplaten voor (licht grijs), deze platen zijn ingeklemd aan de binnenvloer (donkergrijs). De blauwe lijnen zijn de scheidingswanden van de woningen, deze staan om de 4.5m gemodelleerd. Tussen de wanden in het midden bevinden zich de voegen tussen de galerijplaten.

De onderdelen hebben de volgende input:

ID	Galerijplaat	Binnenvloer/NF	Voeg	Wand
Color				
First: M_p^+ (kNm/m)	0	10	0	10
First: M_p^- (kNm/m)	9.72	10	0	10
First: Angle β (°)	0	0	0	0
Second: M_p^+ (kNm/m)	0	10	0	10
Second: M_p^- (kNm/m)	4.98	10	0	10
Second: Angle β (°)	90	90	90	90
Thickness (m)	0.13	0.29	0.13	0.2
Unit Weight (kN/m ³)	25	25	1	25

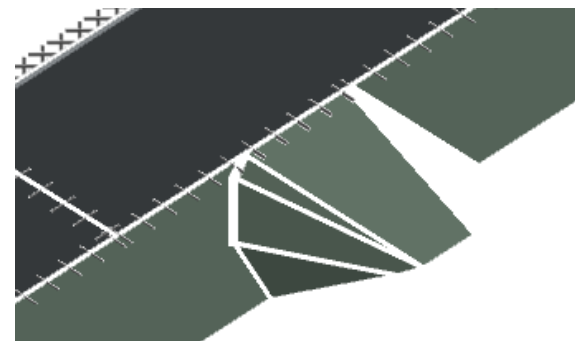
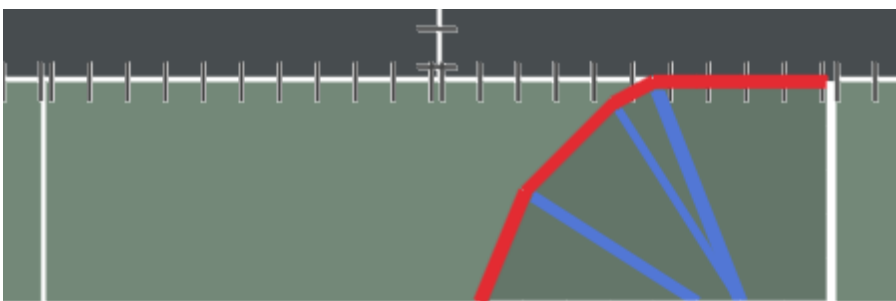
M_p^+ : onderwapening en M_p^- : bovenwapening

Voor de binnenvloer en wand zijn de M_p waarden op 10 kNm/m gesteld zodat deze een goede inklemming simuleren.

De belastingen zijn ingevoerd zoals gemeld in paragraaf 1.4 met de factoren voor het verbouwniveau. De belasting van q_{II} heeft een lengte van 1 meter, de locatie hiervoor is op verschillende plaatsen getoetst, de locatie waarbij de laagste *Adequacy factor* werd gevonden is de maatgevende locatie.

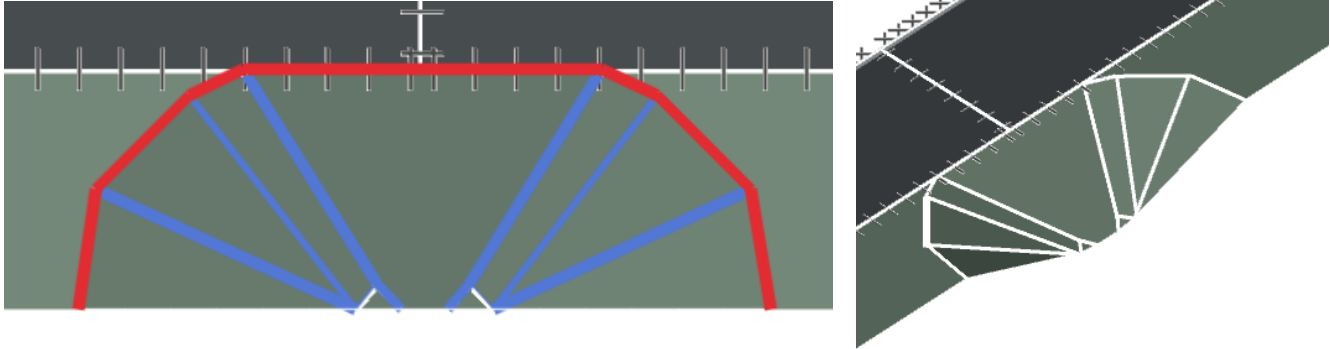
Hieruit is gebleken dat de maatgevende locatie voor de lijnlast q_{II} bij een hoek (of voeg) is, dit was al eerder voorgesteld volgens de CUR-publicatie (1) en hiermee vast gesteld. Vervolgens is de q_{II} last die gevonden uit de vloeilijmentheorie is ingevoerd, $q_{II} = 8,79$ kN/m. LimitState geeft daarbij het volgende vloeilijnenpatroon en een *Adequacy factor* van 0.94, doordat deze factor lager dan 1 is zal de galerijplaat al bezwijken bij deze last. De lijnlast is te hoog, er wordt een *Adequacy factor* van 1,00 gevonden bij $q_{II} = 7,87$ kN/m en is daarmee de maatgevende laagste waarde.

In de figuur hieronder staat het maatgevende vloeilijnenpatroon, het komt deels overeen met het voorgestelde patroon volgens de CUR-Publicatie.

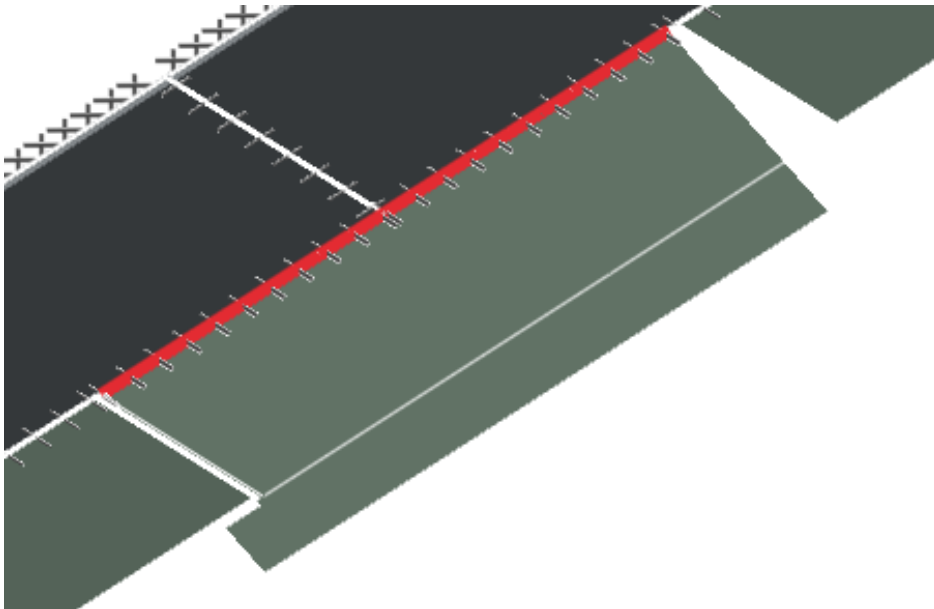


Het tweede vloeilijnen patroon is ook gesimuleerd om de berekeningen te controleren, hiervoor is $q_{II} = 15,66$ kN/m aangenomen zoals dit was berekend hiervoor. De lijnlast is daarbij gesimuleerd halverwege de galerijplaat, tussen twee voegen in.

Uit deze simulatie komt een erg overeenkomend patroon vergeleken met het hand-berekende patroon. De *Adequacy factor* is in dit geval 0.95, de accuratere vloeilijnen verklaren deze lagere factor. Het vloeilijnen patroon staat hieronder weer gegeven en komt in grove vorm overeen met het tweede vloeilijnen patroon uit bijlage 4. Doordat beide simulaties overeenkomende patronen weer gegeven kan er geconcludeerd worden dat het model representatief is.

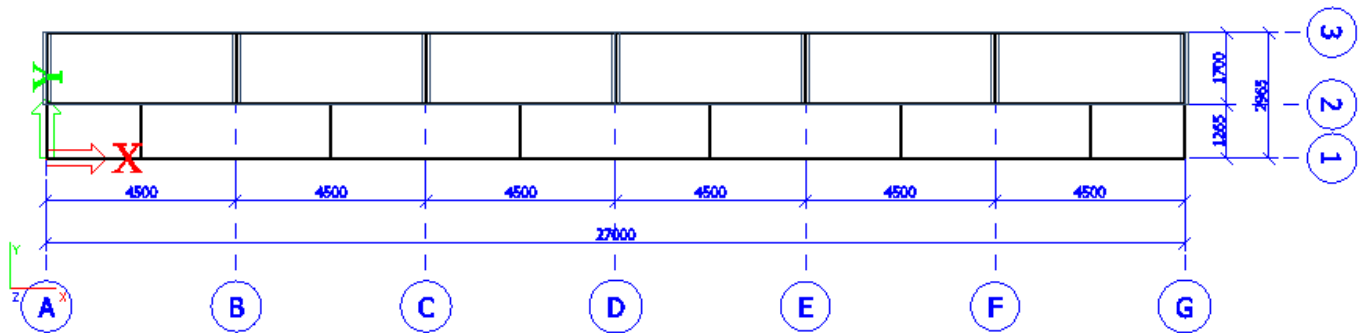


De galerijplaat is geanalyseerd met een afname van 13,6% van de diameter van de wapening. Hierbij kwam de *Adequacy factor* onder de 1 te liggen met $q_{II} = 5,0$ kN/m. Bij een afname van 8,6% van de diameter van de wapening hebben de galerijplaten de volgende maximale momentopnamen: $M_p^- (m_{xn}) = 8,40$ kNm/m en $M_p^+ (m_{yn}) = 4,29$ kNm/m. Met deze nieuwe waarde wordt er een *Adequacy factor* van 1 gevonden bij $q_{II} = 5,0$ kN/m. Het vloeilijnen patroon is hieronder weer gegeven.

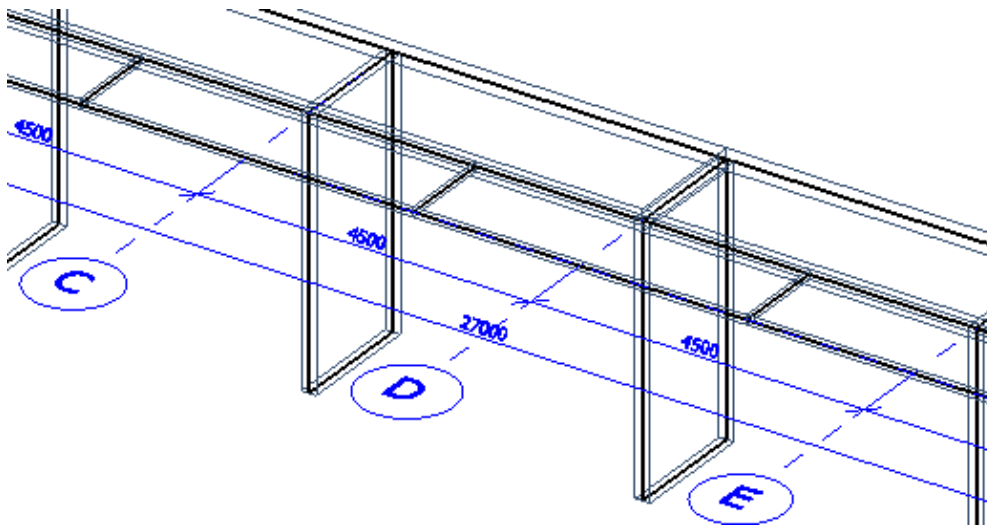


Bijlage 8

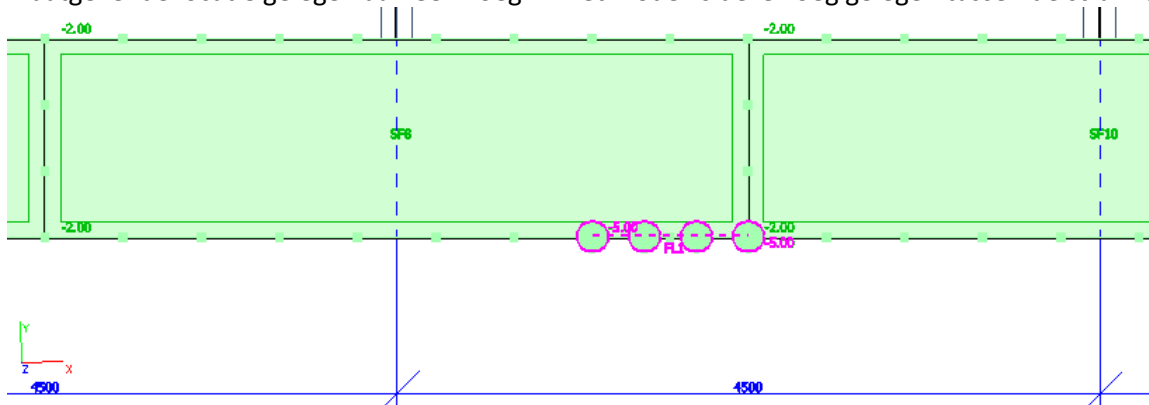
In deze bijlage staan de figuren en waarden die gebruikt zijn in Scia Engineer 15.3.120 – student version. Het model dat is gebruikt staat hieronder weer gegeven, het is vergelijkbaar met het model dat gebruikt is bij LimitState:SLAB. Op de verticale stramienen zijn de draagwanden aan de binnenliggende vloer gemodelleerd. De galerijplaten bevinden zich tussen de stramienen 1 en 2, tussen de stramienen 2 en 3 is de binnenvloer gelegen.

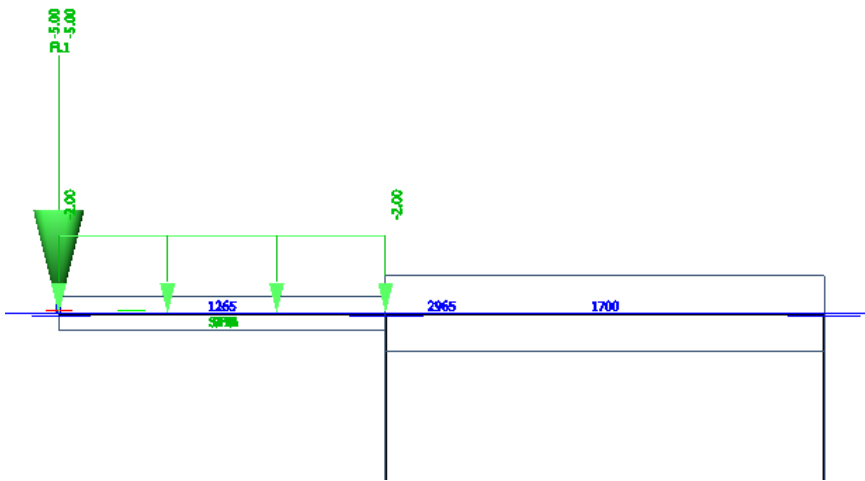


Een 3D beeld van het model, aan de binnenvloer is de draagwand naar de fundering te zien.



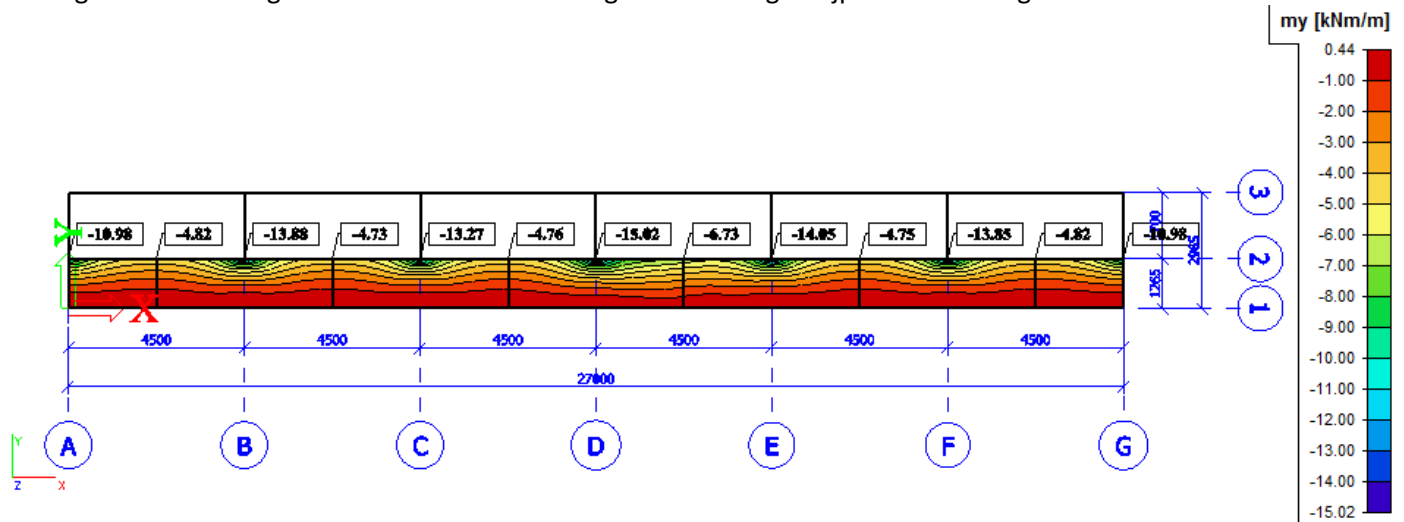
De volgende twee figuren geven de variabele belastingen weer, de locatie voor de lijnlast q_{II} grijpt aan op de maatgevende locatie gelegen aan een voeg. In het model is deze voeg gelegen tussen de stramienen D en E.



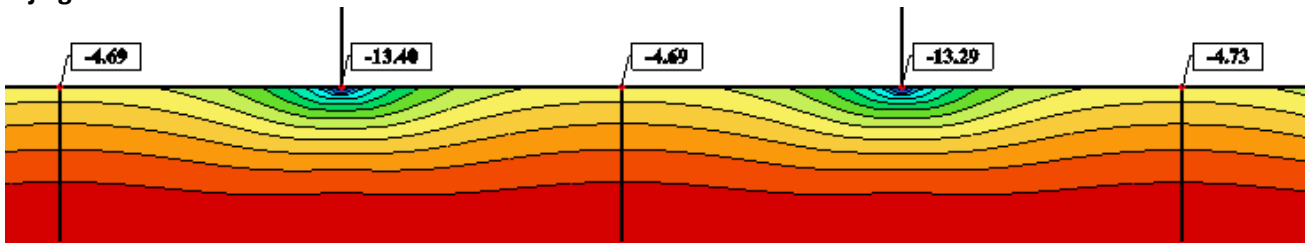


De permanente belastingen staan niet weer gegeven in deze twee figuren, er staat een permanente verdeelde belasting van $0,52 \text{ kN/m}^2$ voor de afwerklaag op de galerijplaten en een lijnbelasting van $0,7 \text{ kN/m}$ op de rand van de plaat voor het hekwerk gesimuleerd. De belastingen zijn ingevoerd als de verbouw-combinatie, waarbij voor de permanente belastingen de factor $\gamma_G = 1.15$ geldt en voor de variabele belasting $\gamma_Q = 1.30$.

De volgende afbeelding laat de momentenverdeling zien van de galerijplaten van het gehele model.



Bijlage 9



Momentverdeling zonder lijnlast q_{II} . De momenten die optreden zijn zonder deze lijnlast alsnog hoger dan de maximale opneembare momenten.