

Rapport

Projectnr.	9464
Project	Tree House
Plaats	Rotterdam
Betreft	Nota Robuustheid
Doc. nr.	9464A003
Revisie	2.0
Status	Definitief
Fase	TO
Bijlagen	-



PRO VAST

Opgesteld door

Gecontroleerd door

Vrijgegeven door

Datum
27-6-2022Datum
27-6-2022Datum
27-6-2022

Contractuele acceptatie door opdrachtgever vereist

Nee

Geaccepteerd door

Handtekening

BAM Advies & Engineering is onderdeel van BAM Bouw en Techniek bv
Handelsregister 30195841 te Utrecht | Statutair gevestigd te Bunnik

Revisiebeheer

Revisie	Datum uitgifte	Omschrijving
0.1	02-12-2021	1 ^e conceptversie interne controle
0.2	09-12-2021	Externe toets
1.0	12-1-2022	Opmerkingen ABT verwerkt. Definitief.
1.1	15-3-2022	Wijzigingen TO-fase, interne controle
1.2	19-4-2022	Definitief TO-fase t.b.v. CC3 toets
2.0	27-6-2022	Definitief TO

Inhoud

1. Inleiding.....	5
1.1 Algemeen	5
1.2 Leeswijzer	6
2. Eisen en beoordelingsmethodiek.....	7
2.1 Wettelijke regeling robuustheid.....	7
2.2 Strategieën voor buitengewone belastingen.....	8
2.3 RER.....	9
2.3.1 Stappen RER.....	9
2.3.2 Classificering incasseringsvermogen.....	10
2.3.3 Classificering gevolg.....	10
2.3.4 Classificering risico	12
2.4 Kritische elementen & kwalitatieve risicoanalyse.....	13
2.4.1 Inleiding	13
2.4.2 Afweging keuze voor kritische elementen o.b.v. een risicoanalyse	13
2.4.3 Lijst van bedreigingen (Protocol Risicobeoordeling)	14
2.4.4 Maatregelen (voor kritische elementen)	15
2.5 Gebruikte literatuur / referenties	15
3. RER Hoogbouw verticaal	16
3.1 Elementen	16
3.1.1 Kolommen	16
3.1.2 Wanden	16
3.1.3 Vloeren/balken	16
3.2 RER analyse.....	18
3.2.1 Incasseringsvermogen per element.....	18
3.2.2 Gevolg	18
3.2.3 Risico	18
3.3 Maatregelen	19
3.3.1 Maatregelen bij omzetten VO naar DO	19
3.3.2 Maatregelen o.b.v. RER.....	19
3.3.3 Element 1: kolommen 0-10 as 3-4	20
3.3.4 Element 2: kolommen 0-10 as C-E-G	24
3.3.5 Element 3: Hoekkolommen 0-10	25
3.3.6 Element 4: Hoekkolommen 11 ^e en hoger.....	27
3.3.7 Element 5: Glijkern toren	28
3.3.8 Element 6: Prefab kernwanden as 3 en 4	29
3.3.9 Element 7: Prefab kernwanden as C, E, G	30
3.3.10 Element 8: Overdrachtswand as 3, 4 op 10 ^e -11 ^e verdieping	32
3.3.11 Element 9: Overdrachtswand as A, J op 10 ^e -11 ^e verdieping.....	33
3.3.12 Element 10: Prefab kernwand trappenhuis.....	34
3.3.13 Element 11: Verdiepingsvloeren breedplaat.....	34
3.3.14 Element 12: Verdiepingsvloeren polyplaat.....	34
3.3.15 Element 13: Trappen/bordessen	34
3.3.16 Element 14: Balkons.....	34
3.3.17 Element 15: Gevelbalken.....	34

4. RER Laagbouw verticaal	35
4.1 Overzicht elementen.....	35
4.1.1 Kolommen	35
4.1.2 Wanden	35
4.1.3 Vloeren/balken	35
4.2 RER analyse.....	37
4.2.1 Incasseringsvermogen per element.....	37
4.2.2 Gevolg	37
4.2.3 Risico	37
4.3 Maatregelen	38
4.3.1 Maatregelen bij omzetten VO naar DO	38
4.3.2 Maatregelen o.b.v. RER.....	38
4.3.3 Element b: Midden en randkolommen beton	39
4.3.4 Element c: Hoekkolommen beton	41
4.3.5 Element d: Glijkern laagbouw	41
4.3.6 Element e: Verdiepingsvloeren polyplaat.....	41
4.3.7 Element h: Trappen/bordessen	41
5. RER Horizontaal	42
5.1 Elementen	42
5.1.1 Kolommen	42
5.1.2 Wanden	42
5.1.3 Vloeren/balken	42
5.2 RER analyse.....	43
5.2.1 Incasseringsvermogen per element.....	43
5.2.2 Gevolg	43
5.2.3 Risico	43
5.3 Maatregelen	44
5.3.1 Maatregelen bij omzetten VO naar DO	44
5.3.2 Maatregelen o.b.v. RER.....	44
5.3.3 Elementen 3 en 6.....	44
6. Bekende buitengewone belastingen.....	45
6.1 Explosies	45
6.2 Aanrijdbelasting.....	45
6.2.1 Voertuigen.....	45
6.2.2 Treinen	45
6.2.3 Trams.....	46

1. Inleiding

In dit document wordt de robuustheidsanalyse behandeld voor het project Tree House te Rotterdam.

1.1 Algemeen

Het project Tree House is gelegen aan het Delftseplein, tussen Rotterdam CS en de gebouwen Delftse Poort (gebouwhoogte 151 m) en Central Post (59 m), zie de figuur hieronder. Aan de noordzijde van het project bevindt zich een spoorzone en aan de zuidzijde een tramlijn. Het project Tree House bestaat uit een gebouwcombinatie van hoogbouw (ca. 126 m) met laagbouw (ca. 31 tot 44 m). De laagbouw bestaat uit kantoorverdiepingen met een commerciële plint. Op de 10^e verdieping bevindt zich een technische ruimte. Vanaf de 11^e verdieping tot de dak verdieping (hoogbouw) is bestemd voor wonen. In de kelder onder de laagbouw bevindt zich een fietsenberging en technische ruimten (o.a. elektra, sprinkler en WKO).



Het project Tree House is ingedeeld gevolgklasse CC3. Hiervoor is een robuustheidsanalyse uitgevoerd, welke in dit document is vastgelegd.

1.2

Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt de werkwijze en beoordelingsmethodiek behandeld. Hierbij worden de belangrijkste onderdelen uit de norm behandeld en worden de uitgangspunten voor de Robuustheid-Effecten-Rapportage (RER) vastgelegd. Tevens worden de uitgangspunten en afwegingskaders voor kritische elementen behandeld.

In hoofdstuk 3 wordt de RER voor verticaal bezwijken van het hoogbouwdeel uitgevoerd, waarbij de onderliggende laagbouw in de beschouwing wordt meegenomen (volledige toren wordt dus beschouwd). De analyse begint met een omschrijving van de elementen. Vervolgens wordt de RER uitgevoerd en worden de maatregelen bepaald. De maatregelen worden tevens getoetst op haalbaarheid.

Hoofdstuk 4 beschrijft de RER voor verticaal bezwijken van de laagbouw, welke naast het hoogbouwdeel staat. Tevens worden de benodigde maatregelen bepaald en getoetst op haalbaarheid.

In hoofdstuk 5 wordt de RER voor horizontaal bezwijken uitgevoerd. Hierin worden de hoogbouw en laagbouw integraal beschouwd. Tevens worden de benodigde maatregelen bepaald en getoetst op haalbaarheid.

Het laatste hoofdstuk, hoofdstuk 6, bevat een korte uitwerking van de bekende belastingen op het gebouw als gevolg van explosie en aanrijding.

2. Eisen en beoordelingsmethodiek

2.1 Wettelijke regeling robuustheid

De regeling robuustheid is wettelijk vastgelegd in het Bouwbesluit via de daarin aangewezen publiekrechtelijke norm NEN-EN1990 via onderstaande aansturende teksten.

- In art. 2.1 (4)P inzake Fundamentele eisen wordt robuustheid impliciet benoemd als: *Een constructie moet zodanig zijn ontworpen en uitgevoerd dat zij niet zal worden beschadigd bij voorvallen als ontploffingen, schokbelastingen en de gevolgen van menselijke fouten, in een mate die niet in verhouding staat tot de aanvankelijke oorzaak.*
- In art. 2.2 inzake regeling betrouwbaarheid wordt robuustheid expliciet benoemd als onderdeel van het constructief ontwerp.
- In art. 2.3 inzake belastingcombinaties worden alleen de bekende belastingen voorgeschreven.
- In bijlage B is een integrale beschouwing betrouwbaarheidsregeling opgenomen. Deze voorziet onder meer in betrouwbaarheidsdifferentiatie vanuit:
 - B.3.3 differentiatie door partiele factoren
 - B.4 Differentiatie van ontwerp en berekeningssupervisie
 - B.5 Inspectie tijdens de uitvoering

In Nederland (NB) is ervoor gekozen om betrouwbaarheid regelingen door partiele factoren en supervisie niet uitwisselbaar te laten zijn maar beide onafhankelijk aan te sturen.

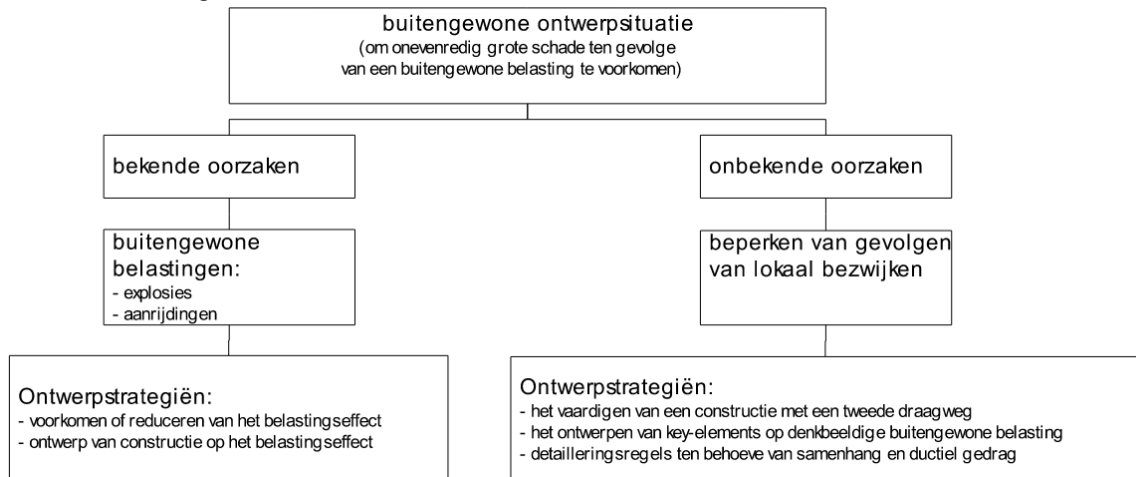
Onderliggende regelingen zijn gegeven in:

- Belastingnormen: Voor dragende constructies kan overeenkomstig NEN-EN1991-1-7 een risicoanalyse worden uitgevoerd ten aanzien van voorziene en niet voorziene buitengewone ontwerpsituaties. Voor gevolgklasse 3 moet een risico-analyse ten aanzien van de gevolgen van een buitengewone belasting voor zowel bekende als onbekende oorzaken worden uitgevoerd.
- Materiaalgebonden normen: In NEN-EN1992-1-1 zijn voor verschillende constructieve toepassingen robuustheidseisen opgenomen.
Voorbeeld 1: NEN-EN1992-1-1 art. 9.10 geeft eisen aangaande trekbanden voor alternatieve belastingpaden.
Voorbeeld 2: In 9.10.2.5 is aangegeven dat in geprefabriceerde constructies van 5 bouwlagen verticale trekbanden moeten zijn aangebracht. Ook is aangegeven dat indien een verticaal dragend element niet doorloopt tot op de fundering, aangenomen moet worden dat het element dat het verticaal dragend element draagt kan bezwijken. Er moet dan een alternatieve belastingsafdracht mogelijk zijn.
- Ten aanzien van eisen gerelateerd aan human factors wordt een regeling opgenomen in het KPCV (o.a. kwaliteitscontrole). Deze geeft verdere invulling aan de eisen aangaande inspectie en supervisie zoals opgenomen in NEN-EN1990 Bijlage B4 en B5. Een voorbeeld is dat supervisie en inspectie bij CC3 objecten wordt belegd bij een onafhankelijke, daartoe gecertificeerde organisatie (TIS).

De eisen uit het bouwbesluit (wettelijk kader) gaan minder ver dan die van de NEN-EN-normen. De NEN-EN-normen worden wel als uitgangspunt voor dit document genomen.

2.2 Strategieën voor buitengewone belastingen

In onderstaande grafiek staan de strategieën aangegeven welke toegepast kunnen worden volgens NEN-EN-1991-1-7. Deze strategieën zijn nog vrij algemeen, maar zijn wel de basis van de uitwerking.



Een constructie moet zodanig zijn ontworpen en uitgevoerd dat zij niet zal worden beschadigd bij voorvallen als:

- ontploffingen,
- schokbelastingen, en
- de gevolgen van menselijke fouten,

in een mate die niet in verhouding staat tot de aanvankelijke oorzaak.

Mogelijke schade moet worden vermeden of beperkt door de juiste keuze van één of meer van de volgende maatregelen:

- vermijden, uitsluiten of beperken van de bedreigingen, waar de constructie tijdens zijn levensduur aan bloot gesteld kan worden;
- kiezen van een constructietype, dat een geringe kwetsbaarheid ten aanzien van de beschouwde bedreigingen heeft;
- kiezen van een constructietype en constructief ontwerp, dat de toevallige verwijdering van een afzonderlijk constructief element of een beperkt deel van de constructie, of het optreden van aanvaardbare lokale schade zonder verder bezwijken kan weerstaan;
- zoveel mogelijk vermijden van constructieve systemen die kunnen bezwijken zonder waarschuwing;
- voldoende robuuste koppeling van de onderlinge constructieve elementen.
- verkleinen van risico's in ontwerp of uitvoering door extra toezicht / controle (voorkomen van bouwfouten).

2.3

RER

Er ligt een voorstel voor een methodiek voor een robuustheidsanalyse, waar Adviesbureau Hageman een tekstvoorstel heeft gemaakt voor een NPR "Robuustheids-Effect-Rapportage" (RER). In dit voorstel wordt de robuustheid van de constructie beoordeeld in relatie tot de bijbehorende gevolgen.

De basis is: $\text{Risico} = \text{Kans} \times \text{Gevolg}$. In het geval van de RER is dit gedefinieerd als $\text{Risico} = \text{Incasseringsvermogen} \times \text{Gevolg}$. Er wordt aangenomen dat de kans op de buitengewone gebeurtenis en de kans op falen bij die gebeurtenis beiden 1.0 zijn. Gegeven het falen van het beschouwde element wordt de kans op voortschrijdende instorting uitgedrukt in het incasseringsvermogen van de constructie.

2.3.1

Stappen RER

De RER is in 3 stappen onderverdeeld, te weten:

- Systeemanalyse.
 - a. Kans op voortschrijdende instorting is afhankelijk van constructietype.
 - b. Gevolg is op basis van % en m2 instorting, rekening houdend met het aantal mensen dat er aanwezig kan zijn (gebruik).
- Beperkte risico analyse (geel). Strategieën zijn:
 - a. Expliciet risico verkleinen (G1). D.w.z. constructie type aanpassen of elementen toevoegen om incasseringsvermogen te vergroten of het gevolg (vloeroppervlak) te verkleinen.
 - b. Impliciet risico verkleinen (G2). Trekbanden (TB) - niet toepasbaar bij hoekkolommen - of kritische elementen toepassen. Bij kritische elementen zijn een hogere materiaalfactor en/of extra inspectie mogelijke maatregelen (zie ook paragraaf 2.4).
 - c. Constructieve risico analyse (RA) o.b.v. NEN-EN-1991-1-7 B.9.2 toepassen. Voor dit project wordt op dit punt een kwalitatieve risico analyse toegepast¹ (zie ook paragraaf 2.4).
- Uitgebreide risico analyse (rood). Strategieën zijn:
 - a. Expliciet risico verkleinen (R1). D.w.z. constructie type aanpassen of elementen toevoegen om gevolg (vloeroppervlak) te verkleinen.
 - b. Uitsluiten voortschrijdende instorting door herberekening zonder het beschouwde element (R2).
 - c. Constructieve risico analyse (RA) o.b.v. NEN-EN-1991-1-7 B.9.2 toepassen. Voor dit project wordt op dit punt een kwalitatieve risico analyse toegepast¹ (zie ook paragraaf 2.4).

Een voorbeeld van een tabel voor de systeemanalyse (systeemmatrix robuustheid) is hieronder getoond.

Zeer groot				
Groot				
▲ Gemiddeld				
Klein				
Gevolg	Zeer groot	groot	Gemiddeld	Klein
Incasserings- vermogen				

Voor het invullen van de systeemmatrix robuustheid zijn definities van de mate van incasseringsvermogen en het gevolg noodzakelijk. Deze wordt in de volgende paragrafen verder uitgewerkt.

¹ In dit rapport wordt de constructieve risico analyse o.b.v. NEN-EN-1991-1-7 B.9.2 ingeruild voor de kwalitatieve risico analyse o.b.v. NEN-EN-1991-1-7 B.4.1. Hier wordt bewust afgeweken van de RER, omdat een constructieve risicoanalyse voor dit project niet realistisch is en ook niet per definitie tot meer robuustheid leidt. Paragraaf 2.4 gaat hier dieper op in.

2.3.2 Classificering incasseringsvermogen

De RER geeft de onderstaande definities voor het incasseringsvermogen.

Verticaal bezwijken

Classificering	Definitie
Zeer groot	Statisch onbepaalde constructies continu (monoliet) uitgevoerd.
Groot	Statisch onbepaalde constructies met grote vervormingscapaciteit uitgevoerd met discrete elementen en sterke verbindingen. De verbindingen zijn minstens zo sterk als de aansluitende onderdelen.
Gemiddeld	Statisch onbepaalde constructies met beperkte vervormingscapaciteit uitgevoerd met discrete elementen en minder sterke verbindingen. De verbindingen zijn minder sterk als de aansluitende onderdelen.
Klein	Statisch bepaalde constructie

Horizontaal bezwijken

Classificering	Definitie
Zeer groot	Constructies met een ten minste driefoudig statisch onbepaald stabiliteit systeem met vloerschijven die monoliet zijn uitgevoerd of zijn voorzien van een doorgaande gewapende druklaag.
Groot	Constructies met een enkel- of tweevoudig onbepaald stabiliteitssysteem met vloerschijven die monoliet zijn uitgevoerd of zijn voorzien van een doorgaande, gewapende druklaag.
Gemiddeld	Constructies met een statisch onbepaald stabiliteitssysteem met vloerschijven die niet monoliet zijn uitgevoerd en niet zijn voorzien van een doorgaande, gewapende druklaag.
Klein	Constructies met een statisch bepaald stabiliteitssysteem

2.3.3 Classificering gevolg

De grootte van het gevolg wordt veelal uitgedrukt in het percentage van de constructie dat is ingestort, bijvoorbeeld oppervlak of volumeverlies.

Het doel bij buitengewone belastingen is altijd veiligheid. Economische overwegingen spelen in principe geen rol. Bij instortingen als gevolg van bijvoorbeeld aardbevingen is Damage State 4 (zie [5]) een zwaar beschadigde constructie, welke niet meer gebruikt kan worden. Dit is economisch verlies en vergelijkbaar met de UGT-situatie. Damage State 5 hoort bij instorting en dit gaat gepaard met volumeverlies tussen de 10-100%, zie onderstaande figuren.



Damage Level: D5 Collapse
Extent of Collapse: 10% of Volume



Damage Level: D5 Collapse
Extent of Collapse: 50% of Volume



Damage Level: D5 Collapse
Extent of Collapse: 100% of Volume

Voor dragend metselwerk met betonnen vloeren is gebleken dat bij instorten een volume verlies van 50% of meer optreedt (So en Pominis, 2012), zie onderstaande tabel. Voor betonnen skeletten gelden dezelfde overlijdenskansen, wat dezelfde volumeverliezen impliceert. Dit gevolg is instorten en wordt daarom als “zeer groot” geclassificeerd, de bovengrens van het gevolg in systeemmatrix.

Constructietype		Typisch volume-verlies	Overlijdenskans bij instorten, i.e. tot het bijbehorende percentage volumeverlies	Referentieaardbeving
Zwak metselwerk	Adobe licht dak	< 50%	0,10	Pisco, 2007
	Adobe zwaar dak	> 75%	0,4 - 0,6	Ancash, 1970 Iran, 1970 - 2003
	Onregelmatige (breuk)steen met houten hellend dak (laagbouw)	40-60%	0,10 - 0,15	Yogyakarta, 2006 Wenchuan, 2008
	Onregelmatige (breuk)steen betonnen daken (laagbouw)	> 70%	0,15 - 0,30	Kashmir, 2005
Dragend metselwerk	Houten vloeren	> 30%	0,09 - 0,12	Italië, 1970 - 1990
	Betonnen vloeren	> 50%	0,10 - 0,18	Chi Chi, 1999 Wenchuan, 2008
Constructief metselwerk	Constructief metselwerk (laagbouw)	-	0,06 - 0,08	Italië, 1970 - 1990
	Constructief metselwerk (4 - 6 verdiepingen)	-	0,13 - 0,16	Italië, 1970 - 1990
	'Confined' metselwerk volgens code	20%	0,02	Chili, 2011
	'Confined' metselwerk van lage kwaliteit	> 60%	0,30	Haiti, 2010

Als ondergrens zijn de waardes uit NEN-EN-1991-1-7, bijlage A.4 gehanteerd. Hier wordt een bezwiken vloeroppervlak van 15% of 100m² per bouwlaag van 2 aangrenzende bouwlagen als acceptabele grens voorgesteld. Dit is daarom overgenomen als laagste classificatie.

In onderstaande tabel is dit samengevat en zijn de gevolgen voor verticaal bezwijken geclassificeerd. Waardes bij tussenliggende gevolgen zijn naar rato verdeeld.

Classificering	A _{vloer} [%] per bouwlaag	A _{vloer} [m ²] per bouwlaag	n _{bouwlagen}
Zeer groot ²	+50%	+350 m ²	+6
Groot	50%	350 m ²	6
Gemiddeld	30%	200 m ²	4
Klein ³	15%	100 m ²	2

Voor horizontaal bezwijken wordt alleen het % verticale belasting dat het bezwiken onderdeel stabiliseert beoordeeld. Deze parameter wordt voorgesteld in het RER rapport en lijkt een logischere keuze dan het aantal bouwlagen of % vloeroppervlak, omdat het % verticale gewicht direct invloed heeft op de stabiliteit in tegenstelling tot de andere parameters. Wel zijn de percentages strenger gekozen, omdat deze voor het hele gebouw gelden in plaats van het vloeroppervlak per bouwlaag.

Classificering	F _{vert} [%]
Zeer groot	+30%
Groot	30%
Gemiddeld	15%
Klein	5%

² Vergelijkbaar met het volumeverlies van ingestorte gebouwen in Damage State 5

³ Minimum eis conform NEN-EN 1991-1-7 bijlage A.4

2.3.4 Classificering risico

In de RER worden verschillende voorstellen gedaan om het risico te classificeren. Hieronder zijn drie robuustheidsmatrixen getoond voor 3 verschillende risicoklassen.

Risicoklasse 1

Zeer groot				
Groot				
Gemiddeld				
Klein				
Gevolg	Zeer groot	Groot	Gemiddeld	Klein
Incasseringsvermogen				

Risicoklasse 2

Zeer groot				
Groot				
Gemiddeld				
Klein				
Gevolg	Zeer groot	Groot	Gemiddeld	Klein
Incasseringsvermogen				

Risicoklasse 3

Zeer groot				
Groot				
Gemiddeld				
Klein				
Gevolg	Zeer groot	Groot	Gemiddeld	Klein
Incasseringsvermogen				

Een belangrijke graadmeter in de risicoklasse is het aantal mensen dat per m² aanwezig kan zijn. Het totaal aantal mensen is niet relevant voor de risicoklasse, want dat wordt in het gevolg meegenomen (bijv. m² vloeroppervlak of aantal verdiepingen). Het aantal mensen per m² hangt af van de gebruiksfunctie en hierin wordt het volgende onderscheid gemaakt:

- Risicoklasse 1: eengezinswoningen, landbouwbedrijfsgebouwen
- Risicoklasse 2: woongebouwen, kantoren, scholen, winkels
- Risicoklasse 3: ziekenhuizen, theaters, stadions

Dit is dus anders dan een gevolgklasse. Bij een gevolgklasse is naast de gebruiksfunctie ook het gevolg meegenomen. Dit gebouw betreft een hoogbouw in gevolgklasse 3 (CC3), maar het risico per m² is niet hoger of lager dan een willekeurig ander kantoor of woongebouw. De gevolgen worden separaat in de RER bepaald en leiden tot een hogere risicoscore in de tabel. Voor het beoordelingskader van het Tree House geldt daarom risicoklasse 2.

2.4 Kritische elementen & kwalitatieve risicoanalyse

2.4.1 Inleiding

De RER veronderstelt dat de kans op schade als gevolg van de buitengewone gebeurtenis 1.0 is en dat de kans dat het element bezwijkt als gevolg van deze schade ook 1.0 is. Dit is gedaan om de RER-analyse te vereenvoudigen, maar dit is niet de werkelijkheid en ook niet gebruikelijk in risicoanalyses. Bij de strategie G2 in de RER is de mogelijkheid om kritische elementen aan te wijzen, maar de RER geeft slechts beperkt aan hoe hier mee om moet worden gegaan. Verder wordt bij de strategie G3 en R3 voor dit rapport een kwalitatieve risicoanalyse voorgeschreven. Deze paragraaf is bedoeld om handvatten te geven voor het uitvoeren van een kwalitatieve risicoanalyse en hoe om te gaan met kritische elementen.

2.4.2 Afweging keuze voor kritische elementen o.b.v. een risicoanalyse

Vaak wordt een element geclassificeerd als kritisch element omdat er geen alternatieve draagweg mogelijk is. Om de robuustheid van de constructie te kunnen waarborgen dienen passende maatregelen genomen te worden. De robuustheid verbetert het meeste als de risico's van een kritisch element inzichtelijk zijn en maatregelen worden toegepast dit risico verlagen tot een acceptabel niveau.

Argumenten die pleiten voor een toepassing van kritische elementen op basis van een risicoanalyse zijn:

- Waarom ontwerp je een element als je het weg kan nemen? Een constructie moet wel logisch, bruikbaar, uitlegbaar en haalbaar blijven en de maatregel mag geen onevenredige impact hebben.
- Systematische fouten in seriesystemen zoals (verbindingen in) vakwerken of gestapelde kolommen. Dan treedt de fout op in alle elementen en wanneer de alternatieve draagweg deel uitmaakt van het serie systeem, is de faalkans niet afgenomen.
- De meeste constructies storten in door menselijke fouten, d.w.z. ontwerp en uitvoeringsfouten. Denk aan het AZ-stadion, de Grolsch-Veste, balkons Maastricht, parkeergarage Wormerveer, theater Hoorn, parkeerdek Van der Valk in Tiel, etc. Het is zinvoller om de problemen bij de bron aan te pakken.
- Soms kan het niet anders, zonder een disproportionele impact op het gebouwonwerp, zoals bij statisch bepaalde vakwerken of in geval van veel hoekkolommen.
- Een alternatieve draagweg verkleint het gevolg, maar geeft vaak wel veel (economische) schade aan een gebouw. In dat geval is voorkomen beter dan genezen en kan een kritisch element met goede maatregelen zinvoller zijn.
- Sommige elementen zijn zo sterk dat de faalkans nihil is, zelfs bij het optreden van een buitengewone onbekende belasting. Een alternatieve draagweg zal bij dit soort elementen nauwelijks bijdragen aan de algehele veiligheid tegen voortschrijdend instorten.

De weerstand van een seriesysteem is zo sterk als de zwakste schakel. Een seriesysteem bestaat per definitie uit kritische elementen. De robuustheid van dit seriesysteem verbetert dan alleen als alle schakels sterker worden, of als de faalkans van een schakel afneemt. Bij parallel systemen ligt een alternatieve draagweg meer voor de hand omdat verschillende schakels het van elkaar kunnen overnemen.

2.4.3 Lijst van bedreigingen (Protocol Risicobeoordeling)

Het protocol voor Risicobeoordeling [4] geeft een overzicht van bedreigingen waarbij rekening gehouden dient te worden en om hier passende maatregelen bij te treffen. Hieronder is deze lijst overgenomen.

Belastingen

- belasting door eigen gewicht
- wind
- water (regenwater, grondwater, oppervlaktewater, overstroming)
- inboedel en installaties
- mensen
- brand (aansteken, volgend op explosie, na kortsluiting, door falen apparatuur (lift))
- explosie (bom, gevaarlijke goederen) in kelder of hoger
- botsing (voer/vaar/vliegtuigen, uit vliegtuig geworpen objecten hijsbewegingen)
- voorspanning
- aanwezigheid en transport van gevaarlijke stoffen (ook door leidingen)
- dijkdoorbraken
- aardbevingen
- aardverschuivingen
- terroristische of andere aanslagen (ambassades, regerings/bankgebouwen)
- kleef
- zettingen
- trillingen door verkeer of werkzaamheden

Grond

- afwijkende grondeigenschappen
- ontspanning
- ontgraving
- liquefaction

Geometrie

- dimensies
- excentriciteiten

Materialen

- ontmenging
- verkeerde bouwstoffen
- verkeerde mengverhoudingen
- verkeerde omstandigheden
- aantasting (corrosie)

Fouten

- ontwerpfouten / rekenfouten / verkeerde aannamen
- fouten in tekeningen
- uitvoeringsfouten
- verkeerde aflezing van tekening of bestek
- miscommunicatie
- verkeerd gebruik
- niet ontdekt of verwaarloosd waarschuwingsgedrag

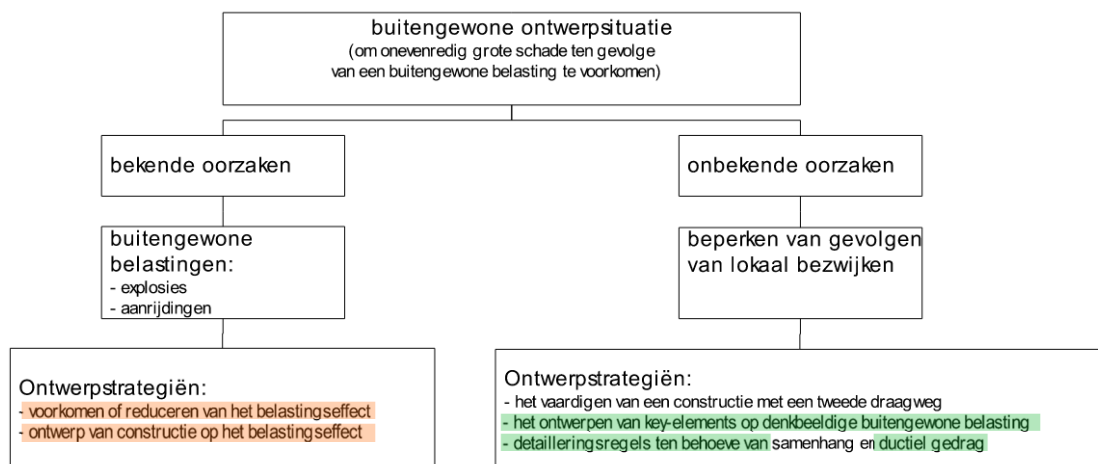
Indien kritische elementen een logische oplossing zijn voor deze constructie, zal deze lijst gebruikt worden om kans op - of de faalkans bij - de buitengewone belasting inzichtelijk te maken en hier passende maatregelen op te nemen om deze te verlagen.

2.4.4 Maatregelen (voor kritische elementen)

Hieronder staat een opsomming van maatregelen voor het vergroten van de robuustheid (van kritische elementen). Geadviseerd wordt om meerdere maatregelen te combineren.

- Constructie waarschuwend vermogen geven. Dit kan bereikt worden door brosse mechanismen sterker te maken (oversterkte) dan ductiele mechanismen, zodat brosse breuk wordt uitgesloten.
- Menselijke fouten in ontwerp en uitvoering minimaliseren door intensievere (externe) controle en/of metingen van het eindresultaat.
- Hogere materiaalfactor in rekening brengen, zodat onzekerheid in de kwaliteit en/of het effect menselijke fouten in de uitvoering verdisconteerd worden.
- Hogere belastingfactor of conservatieve belastingaannamen om onzekerheid in de belasting weg te nemen.
- Gevoeligheden van de constructie onderzoeken (zie lijst met bedreigingen) en deze verbeteren.
- De constructie berekenen op bedreigingen (zie de voorgaande lijst), bekende buitengewone belastingen zoals aanrijding, aardbeving of een explosie. Bij een explosie dient bij kolommen een horizontale puntlast aangehouden te worden (bijv. 200 kN, teruggerekend vanuit capaciteit gevels) omdat de gevels vaak aan kolommen gekoppeld zijn⁴.

Bovenstaande maatregelen sluiten aan bij de genoemde strategieën in NEN-EN-1991-1-7, zie de onderstaande gemarkeerde teksten uit deze norm.



2.5 Gebruikte literatuur / referenties

- [1] NEN-EN 1990 Eurocode 0: Grondslagen van het constructief ontwerp
- [2] NEN-EN 1991 Eurocode 1-7: Belastingen op constructies
- [3] Voorlopig eindrapport RER methode voor TGB Basiseisen en belastingen, WG Robuustheid, dd. 2021-02-22.
- [4] NEN handout: Workshop Robuustheid, dd. 2012-11-22.
- [5] Notitie TNO: berekenen van individueel risico ten gevolge van aardbevingen op basis van sommatie grenstoestanden, 13 juni 2016, Prof.dr.ir. R.D.J.M. Steenbergen.
- [6] Manual for the systematic riskassessment of high-risk structures against disproportionate collapse, IStructE, October 2013
- [7] K009494A001, Ontwerpnota (constructieve uitgangspunten) Tree House, BAM Advies & Engineering.

⁴ Dit is bij het Tree House overigens niet het geval.
BAM Advies & Engineering

3. RER Hoogbouw verticaal

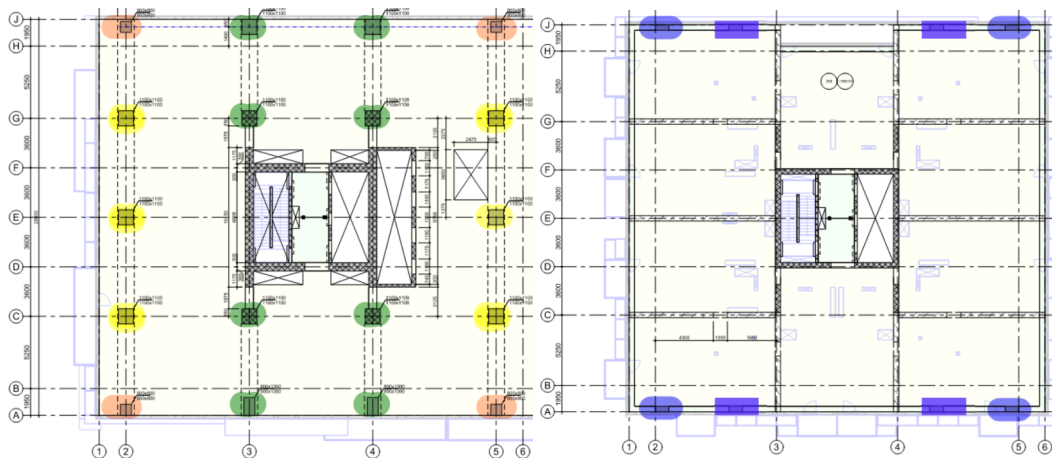
3.1 Elementen

In de hoogbouw kunnen de onderstaande elementen beschreven worden.

3.1.1 Kolommen

De volgende kolommen zijn te onderscheiden:

1. Kolommen bg t/m 10^e onder kernwanden as 3 en 4
2. Kolommen bg t/m 10^e onder kernwanden as C, E G
3. Hoekkolommen bg t/m 10^e
4. Hoekkolommen 11^e en hoger



3.1.2 Wanden

De volgende wanden zijn te onderscheiden:

5. Glijkern toren
6. Prefab kernwanden as 3,4 (hoogbouw)
7. Prefab kernwanden as C, E, G (hoogbouw)
8. Overdrachtswand as 3, 4 op 10^e-11^e verdieping
9. Overdrachtswand as A, J op 10^e-11^e verdieping
10. Prefab kernwanden trappenhuis

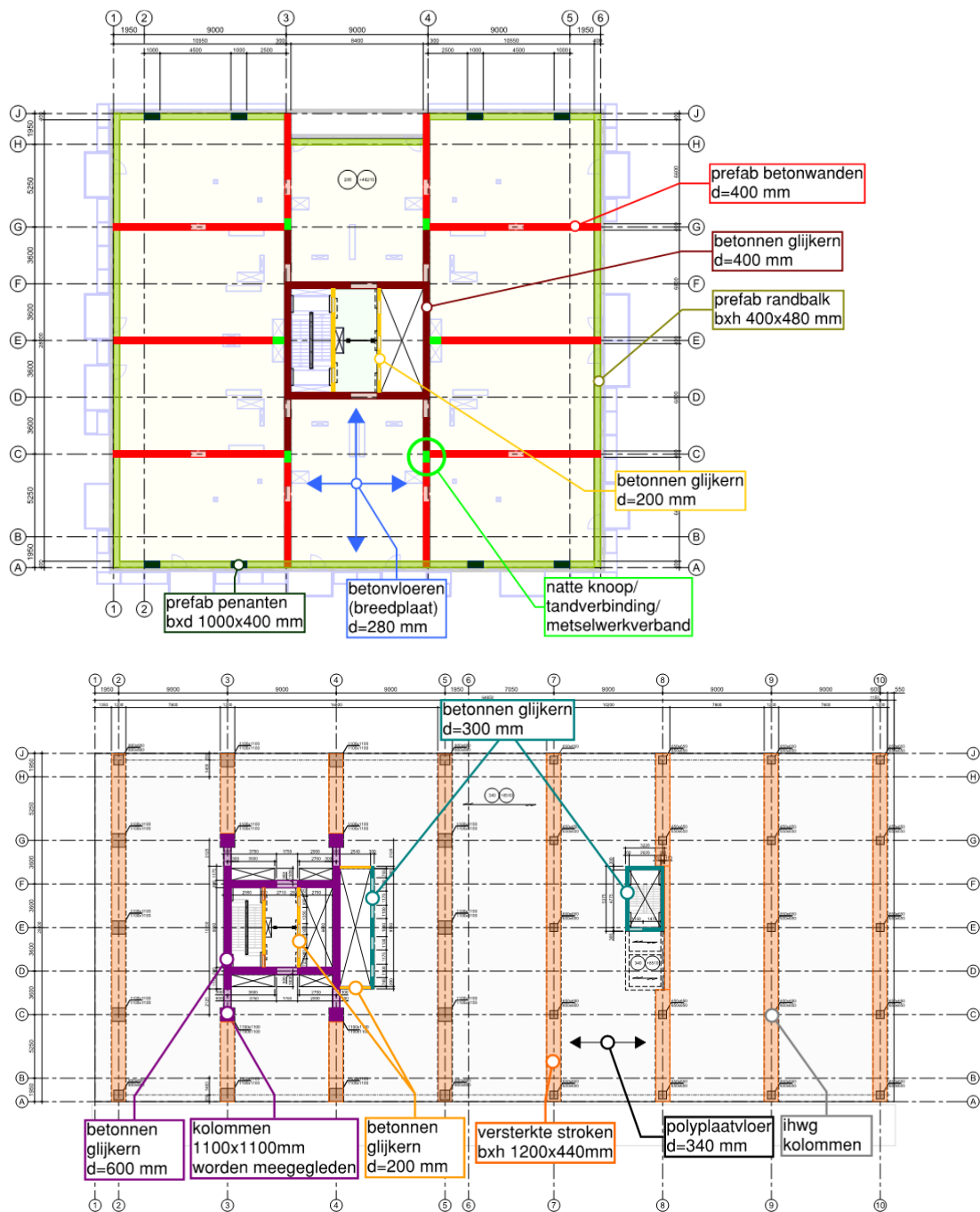
Zie figuren volgende pagina.

3.1.3 Vloeren/balken

De volgende vloeren/balken zijn te onderscheiden:

11. Verdiepingsvloeren breedplaat
12. Verdiepingsvloeren polyplaat (incl. versterkte stroken)
13. Trappen/bordessen
14. Balkons
15. Gevelbalken (hoogbouw)

Zie figuren volgende pagina.



3.2 RER analyse

3.2.1 Incasseringsvermogen per element

In onderstaande tabel wordt per element het incasseringsvermogen beoordeeld.

#	Element	Incasserings- vermogen	Toelichting
1	Kol_0-10_3-4	Gemiddeld	In situ kolom, beperkte herverdelingscap.
2	Kol_0-10_C-G	Gemiddeld	In situ kolom, beperkte herverdelingscap.
3	HoekKol_0-10	Gemiddeld	In situ kolom, beperkte herverdelingscap.
4	HoekKol_11+	Klein	Prefab, statisch bepaald
5	Glijkern_toren	Zeer groot	In situ, doorgaand (ook wapening)
6	Prefab_kw_3-4	Gemiddeld	Prefab, statisch onbepaald (door vloeren)
7	Prefab_kw_C-E-G	Gemiddeld	Prefab, statisch onbepaald (door vloeren)
8	ODW_10-11_3-4	Zeer groot	In situ, doorgaand
9	ODW_10-11_A-J	Zeer groot	In situ, doorgaand
10	Prefab_kw_traphs	Klein	Statisch bepaald
11	Vloeren_brdpl	Gemiddeld	Statisch onbepaald, prefab onderschil beperkt ductiliteit vloer
12	Vloeren_polypl	Gemiddeld	Statisch onbepaald, prefab onderschil beperkt ductiliteit vloer
13	Trap_bord	Klein / gemiddeld	Trap: statisch bepaald Bordes: 1-voudig statisch onbepaald
14	Balkons	Klein	Statisch bepaald (uitkraging)
15	Gevelbalken	Zeer groot	Statisch onbepaald, doorgaand (ook wap)

3.2.2 Gevolg

In onderstaande tabel wordt per element het gevolg beoordeeld.

#	Element	Gevolg	Toelichting
1	Kol_0-10_3-4	Zeer groot	Draagt meer dan 6 bouwlagen
2	Kol_0-10_C-G	Zeer groot	Draagt meer dan 6 bouwlagen
3	HoekKol_0-10	Zeer groot	Draagt meer dan 6 bouwlagen
4	HoekKol_11+	Zeer groot	Draagt meer dan 6 bouwlagen
5	Glijkern toren	Groot	Draagt meer dan 6 bouwlagen
6	Prefab_kw_3-4	Zeer groot	Draagt meer dan 6 bouwlagen
7	Prefab_kw_C-E-G	Zeer groot	Draagt meer dan 6 bouwlagen
8	ODW_10-11_3-4	Zeer groot	Draagt meer dan 6 bouwlagen
9	ODW_10-11_A-J	Zeer groot	Draagt meer dan 6 bouwlagen
10	Prefab_kw_traphs	Klein	Beperkt aantal personen in trappenhuis.
11	Vloeren_brdpl	Klein	A _{vloer} : 50m ² (5%), 1 bouwlaag
12	Vloeren_polypl	Klein	A _{vloer} : 50m ² (5%), 1 bouwlaag
13	Trap_bord	Klein	Beperkt aantal personen in trappenhuis.
14	Balkons	Groot	Overige balkons vallen mee na impact en vallen op openbare weg. Geen HDC.
15	Gevelbalken	Klein	A _{vloer} : 50m ² (5%), 1 bouwlaag (per element)

3.2.3 Risico

Hieronder worden de risico profielen van de elementen bepaald.

Zeer groot	5, 8-9		1-3,6-7	4
Groot				14
Gemiddeld				
Klein	15		11,12	10,13
Gevolg	Zeer groot	Groot	Gemiddeld	Klein
	Incasseringsvermogen			

3.3 Maatregelen

3.3.1 Maatregelen bij omzetten VO naar DO

In het DO zijn de volgende onderdelen toegevoegd of gewijzigd met onder andere het oog op robuustheid:

- Kanaalplaten met THQ zijn polyplaat met versterkte stroken geworden.
- Scheve gevelkolommen hoogbouw recht gezet (geen trekbanden voor evenwicht = risico).
- Doorgaande overdrachtsconstructie op as A en J toegevoegd.
- Doorgaande overdrachtsconstructie op as 3 en 4 toegevoegd.
- Prefab wanden hoogbouw. Deze geeft een vermindering van de robuustheid, zie voorgaande paragraaf en zijn aanvullende maatregelen nodig, zie hieronder.

3.3.2 Maatregelen o.b.v. RER

Bij de strategie is de kleur uit de RER-analyse overgenomen, maar is in tekst de toegepaste strategie aangegeven. De gekozen strategie in de tekst kan afwijken van de kleur.

#	Element	Strategie	Maatregel
1	Kol_0-10_3-4	R2	Diverse alternatieve draagwegen
2	Kol_0-10_C-E-G	R2	Diverse alternatieve draagwegen
3	HoekKol_0-10	R2	Alternatieve draagweg gevelwand 10 ^e -11 ^e
4	HoekKol_11+	R2	Alternatieve draagweg in verd. vloeren 11 ^e en hoger
5	Glijkern toren	G2	Kritisch element
6	Prefab_kw_3-4	R2	Alternatieve draagweg wandschijfwerking
7	Prefab_kw_C-E-G	R2	Alternatieve draagweg wandschijfwerking
8	ODW_10-11_3-4	R2	Alternatieve draagweg wandschijfwerking
9	ODW_10-11_A-J	G2	Wand heeft beperkte functie primaire draagweg. Alternatieve draagwegen overige elementen.
10	Prefab_kw_trapshs	R2	Alternatieve draagweg door iedere wand tevens op te leggen op de bordessen (en tevens kniksteun)
11	Vloeren_brdpl	NVT	Vloeren voorzien van opstaande voegwapening. Incasservermogen neemt toe door versterken kritische voegdetail.
12	Vloeren_polypl	NVT	Vloeren 1-richting overspannend berekenen in AGT. Geen momentwapening t.p.v. voeg nodig.
13	Trap_bord	G2	Bordes: alternatieve draagweg Trap: kritisch element (geen hdc ⁵)
14	Balkons	G2	Kritisch element (geen hdc)
15	Gevelbalken	NVT	

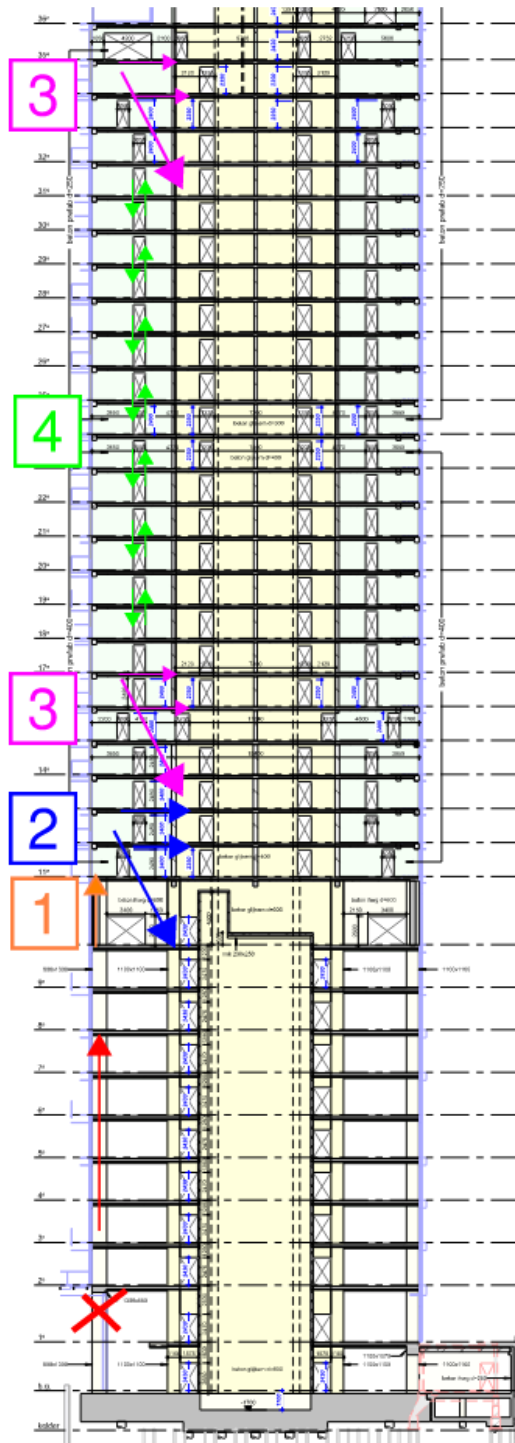
In de volgende paragrafen wordt de haalbaarheid van deze maatregelen onderzocht.

⁵ Het wegnemen van het element leidt niet tot voortschrijdende instorting omdat het element geen onderdeel van de hoofddraagconstructie is.

3.3.3 Element 1: kolommen 0-10 as 3-4

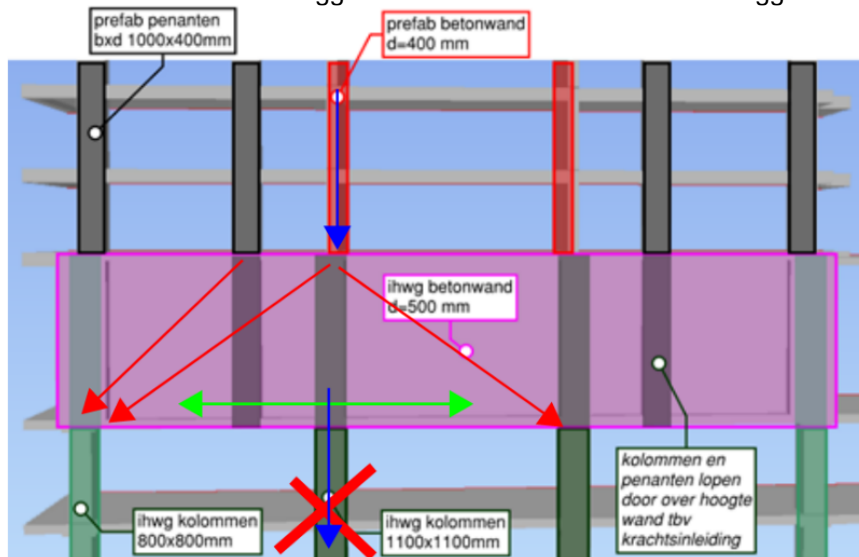
In onderstaande figuur zijn de alternatieve draagwegen getoond als gevolg van het bezwijken van de kolommen op as 3-4 ter plaatse van het rode kruis. Er treden grofweg 4 alternatieve draaglijnen op, namelijk:

1. Overdrachtswand as A-J op 10^e verdieping → hangt onderliggende kolom op.
2. Overdrachtswand as 3-4 op 10^e verdieping → steunt bovenliggende verdiepingen.
3. Wand met versprongen deursparing op 11^e, 15^e en 33^e verdieping.
4. Wand met deursparingen op as 3-4, 10^e verdieping en hoger.



Toetsing capaciteit draagweg 1

In onderstaande figuur is het schema van de wandligger getoond. De ophangbelasting uit de kolom moet door de wandligger verdeeld worden naar de naastliggende kolommen.



Belasting uit verdieping 0-10

Vloer	=	$10 \cdot (9 \cdot 4) \cdot (7.55 + 5.0 \cdot 0.3)$	=	3240 kN
Kolom	=	$10 \cdot (1.1 \cdot 1.1 \cdot 3.41) \cdot 25$	=	950 kN
Gevel	=	$10 \cdot 9 \cdot 3.75 \cdot 1.0$	=	338 kN
Totaal			=	4530 kN

De dwarskrachtcapaciteit van de overdrachtswand (C53/65) is:

- $V_{Rd,max} = 0.9 \cdot (1 - 53/250) \cdot (53/1.5) \cdot \sin(30) \cdot \cos(30) = 6.51 \text{ N/mm}^2$
- $V_{Rd,max} = 500 \cdot 5.5 \cdot 6.51 = 17900 \text{ kN}$
- $V_{Ed} = 4530/2 = 2265 \text{ kN}$

De benodigde buigwapening in de wandligger is ongeveer:

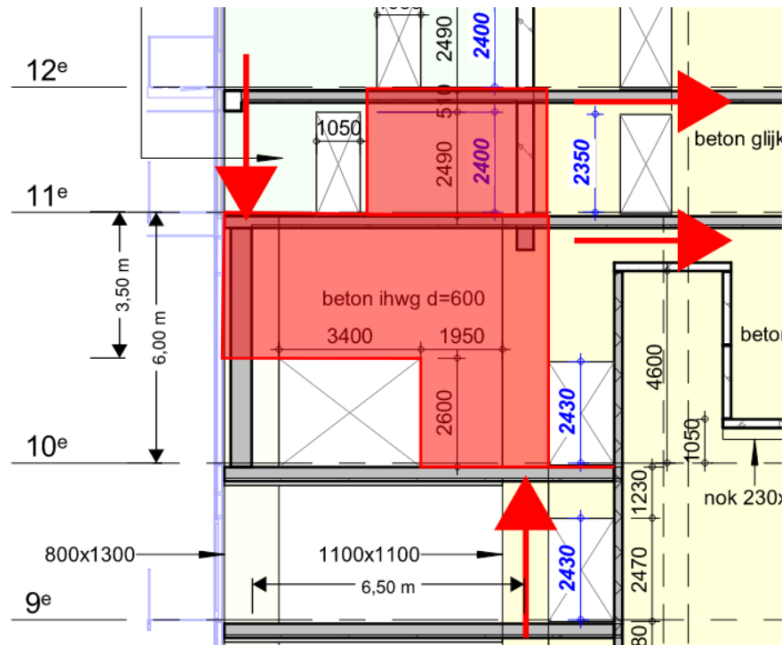
- $A_s = (4530/2) \cdot 9.0 / (0.8 \cdot 6.0 \cdot 0.500) = 8100 \text{ mm}^2$
- Praktisch te wapenen met $\varnothing 20/25$ staven.

Ophangwapening kolommen:

- $A_{s,ophang} = 9060 \text{ mm}^2$ in kolom 1.1×1.1 ($\rho = 0.75\%$)
- Ruim onder benodigde UGT (druk-) wapening.

Toetsing capaciteit draagweg 2

Hieronder is het schema voor draagweg 2 gegeven. Deze wand dient de belasting uit de gevelkolom naar de kern af te dragen.



Belasting uit gevel kolom verdieping 11-36

Vloer	=	$25 \cdot (5.5 \cdot 2.6) \cdot (8.9 + 1.75 \cdot 0.3)$	=	3370 kN
Gevel	=	$25 \cdot 5.5 \cdot 3.75 \cdot 1.0$	=	515 kN
Totaal			=	3885 kN

De dwarskrachtcapaciteit van de overdrachtswand (C53/65) is:

- $V_{Rd,max} = 0.9 \cdot (1 - 53/250) \cdot (53/1.5) \cdot \sin(30) \cdot \cos(30) = 6.51 \text{ N/mm}^2$
- $V_{Rd,max} = 600 \cdot 3.5 \cdot 6.51 = 13670 \text{ kN}$
- $V_{Ed} = 3885 \text{ kN} << V_{Rd,max}$

De benodigde buigwapening in de wandligger is ongeveer:

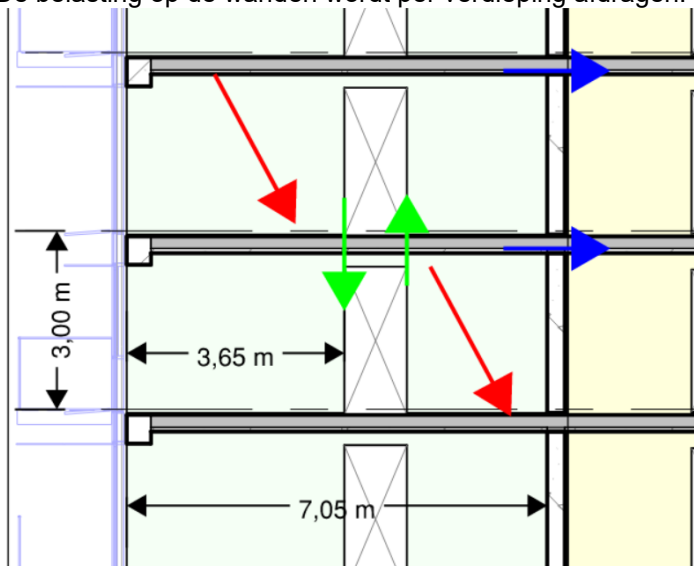
- $A_s = (3885) \cdot 6.5 / (7.0 \cdot 0.500) = 7215 \text{ mm}^2$
- Praktisch te wapenen met $\varnothing 20/25$ staven.

Toetsing capaciteit draagweg 3

De capaciteit van draagweg 3 is een vereenvoudiging van draagweg 4 (enkel de trekbanden a.g.v. de blauwe krachten gelden). Zie vervolg voor toetsing draagweg 4.

Toetsing capaciteit draagweg 4

De belasting op de wanden wordt per verdieping afdragen.



Per verdieping is de q-last:

- Vloer: $q = 4.5 \cdot (8.9 + 0.3 \cdot 1.75) = 42 \text{ kN/m}$
- Wand: $q = 2.72 \cdot 0.4 \cdot 25 = 27 \text{ kN/m}$
- Totaal: $q = 69 \text{ kN/m}$

De trekband T (blauwe pijl) wordt dan:

- Belasting: $F_1 = 7 \cdot 69 = 483 \text{ kN}$
- Trekbandwapening: $A_s = 620 / \tan(60) / 0.500 = 558 \text{ mm}^2$

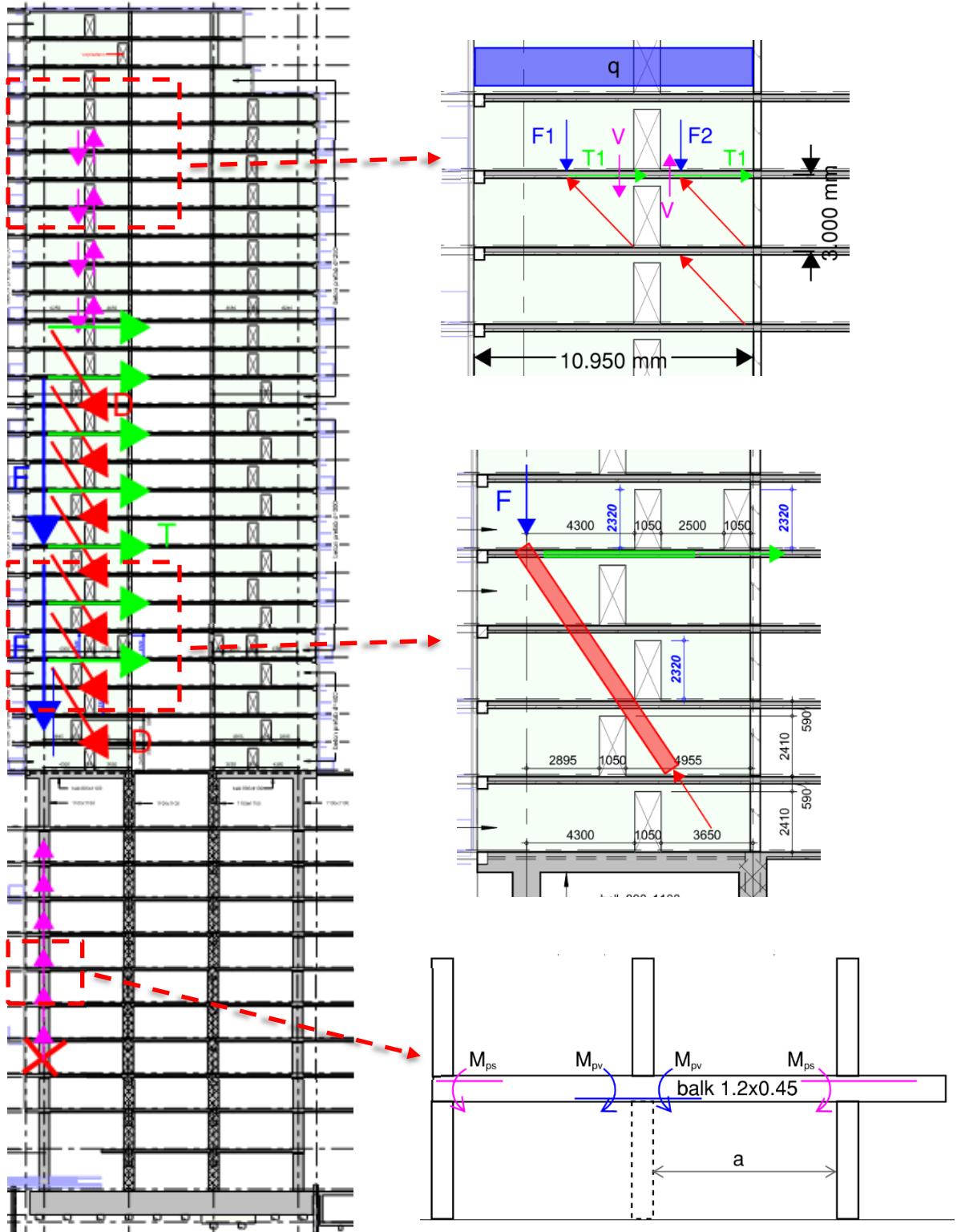
Voor de latei geldt:

- Belasting: $V = 3.6 \cdot 69 = 248 \text{ kN}$
- Buigwapening: $A_s = 248 \cdot (1.05/2) / (0.8 \cdot 0.54 \cdot 0.500) = 604 \text{ mm}^2$
- Dwarskracht: $V_{Rd;max} = 6.5 \cdot 500 \cdot 400 / 1000 = 1300 \text{ kN} \gg 248 \text{ kN} \rightarrow \text{OK}$

3.3.4 Element 2: kolommen 0-10 as C-E-G

De alternatieve draagweg voor kolommen op as C-G heeft 3 systemen:

1. De bovenste helft van de hoogbouwwanden draagt de belasting via de lateien.
2. De onderste helft van de hoogbouwwanden draagt de belasting via drukdiagonalen.
3. De laagbouw (kantoren) draagt de belasting per verdieping via de balken.



Systeem 1

Per verdieping is de q-last (20% van de vloerbelasting wordt herverdeeld naar de naastliggende wanden i.v.m. steunpuntszakking in alternatieve draagweg):

- Vloer: $q = 0.8 \cdot 7.2 \cdot (8.9 + 0.3 \cdot 1.75) = 54 \text{ kN/m}$
- Wand: $q = 2.72 \cdot 0.4 \cdot 25 = 27 \text{ kN/m}$
- Gevel: $q = 3.0 \cdot 1.0 \cdot 7.2 / 9.0 = 3 \text{ kN/m}$
- Totaal: $q = 84 \text{ kN/m}$

Voor de latei geldt:

- Belasting: $V = F_1 = 6.2 \cdot 84 = 520 \text{ kN}$
- Buigwapening: $A_s = 520 \cdot (1.05/2) / (0.8 \cdot 0.56 \cdot 0.500) = 1220 \text{ mm}^2$
- Dwarskracht: $V_{Rd,max} = 6.69 \cdot 500 \cdot 400 / 1000 = 1600 \text{ kN} > 520 \text{ kN} \rightarrow \text{OK}$

De trekband T1 wordt dan:

- Belasting: $F_1 = (11 - 3.6/2) \cdot 84 = 773 \text{ kN}$
- Trekbandwapening: $A_s = 773 \cdot \tan(60) / 0.500 = 900 \text{ mm}^2$
- Praktisch afwapenen in vloerwapening

Systeem 2

Voor systeem 2 hoeft alleen de trekbandwapening van systeem overgenomen te worden.

- Trekbandwapening: $A_s = 900 \text{ mm}^2$
- Praktisch afwapenen in vloerwapening
- Zie paragraaf 3.3.9 voor de overige effecten op de vloerschijf.

Systeem 3

Wanneer de kolom wegvalt dient de balk van $1.2 \cdot 0.45 \text{ m}^2$ een dubbele overspanning te maken. De hangkolom zal iets zakken en de vloeren zullen herverdelen naar naastliggende steunpunten (0.3L gaat naar de hangkolom). De benodigde capaciteit van de balk is :

- $F = (5.0 \cdot 7.2) \cdot (7.55 + 0.3 \cdot 5.0) + (1.1 \cdot 1.1 \cdot 3.4) \cdot 25 = 324 + 103 = 427 \text{ kN}$
- Interne energie plastische scharnieren: $E = \sum M_p \cdot \delta / a = 4 \cdot M_p \cdot \delta / 6.25 = 0.64 \cdot M_p \cdot \delta$
- Arbeid belasting: $A = F \cdot \delta$
- $A = E \rightarrow F = 0.64 \cdot M_p \rightarrow M_p = 427 / 0.64 = 667 \text{ kNm}$
- $A_s = 667 / (0.8 \cdot 0.45 \cdot 0.500) = 3705 \text{ mm}^2$ balkwapening

Ter vergelijking is de volgende balkwapening in de UGT nodig:

- $q_{Ed} = (1.32 \cdot 7.55 + 1.65 \cdot 5) \cdot (9/2 + 2) = 118 \text{ kN/m}$
- $M_{Ed} = 1/10 \cdot 118 \cdot 7.2^2 = 614 \text{ kNm} \rightarrow \sim M_p = 667 \text{ kNm}$

Alternatief is een trekband, echter dan is de doorbuiging erg groot. Om te voorkomen dat de kolommen onbedoeld aan de bovenliggende wanden gaan hangen, moet de doorbuiging beperkt blijven, bijvoorbeeld tot 0.5m. In paragraaf 4.3.3 wordt een formule gegeven voor een trekband, te weten:

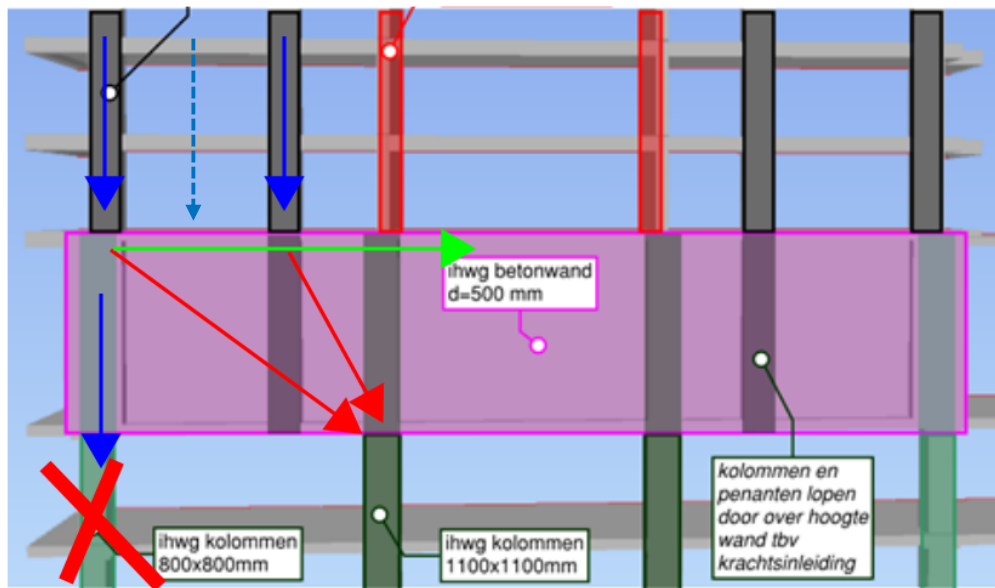
- $T = F/2 \cdot \sqrt{1 + L^2/(4w^2)}$
- Met $L=14.4$ en $w=0.5\text{m}$ wordt dit: $T = 7.2F = 3800 \text{ kN} \rightarrow A_s = 7600 \text{ mm}^2$

Trekbandwapening is dus minder efficiënt dan buigwapening bij kleine doorbuigingen.

3.3.5

Element 3: Hoekkolommen 0-10

De wand op as A en J op de 10^e verdieping voorziet in een alternatieve draagweg wanneer een hoekkolom bezwijkt. Dit is in onderstaande figuur weergegeven.



Totale belasting F

De vloerbelastingafdracht van de vloeren naar de kolom is 0.3L in AGT i.v.m. zakking v.d. hoekkolom en plastische steunpuntmomenten in de vloeren/balken. Kolommen op as 5 zijn maatgevend.

Belasting 1-10

Vloer =	$10 \cdot (3.2 \cdot 5.4) \cdot (7.55 + 5 \cdot 0.3)$	= 1555 kN
Kolom =	$10 \cdot (0.8 \cdot 0.8 \cdot 3.41) \cdot 25$	= 546 kN
Gevel =	$10 \cdot 5.4 \cdot 3.75 \cdot 1.0$	= 203 kN
Totaal		= 2305 kN

Belasting 11-38

Vloer =	$27 \cdot (9.5 \cdot 2.2) \cdot (8.9 + 1.75 \cdot 0.3)$	= 5321 kN
Kolom =	$27 \cdot 2 \cdot (0.4 \cdot 1.0 \cdot 3.41) \cdot 25$	= 1842 kN
Gevel =	$27 \cdot (9.5 + 3.0) \cdot 3.75 \cdot 1.0$	= 1266 kN
Totaal		= 8429 kN

Toetsing wand as A/J

Op te nemen door overdrachtswanden as A/J en as 3-4:

$$F_{v,Ed} = 2305 + 8429 = 10779 \text{ kN}$$

De dwarskrachtcapaciteit van de wand is (C80/95):

$$V_{Rd,max} = 6.51 \text{ N/mm}^2 \quad (\theta=30^\circ)$$

$$V_{Rd,max} = 500 \cdot 5.0 \cdot 6.51 = 16275 \text{ kN}$$

$$UC = 10779 / 16275 = 0.51 < 1.00$$

$$A_{sv} = (2305 + 8429 / 2) / (4.8 \cdot \cot(30^\circ) \cdot 0.500) = 1600 \text{ mm}^2/\text{m} = \text{praktische vert. wapening}$$

Trekbandwapening:

$$z = 0.8 \cdot 6.0 = 4.8 \text{ m}$$

$$M_{Ed} = 9.0 \cdot (2305 + 8429 / 2) + 3.0 \cdot (8429 / 2) = 71319 \text{ kNm}$$

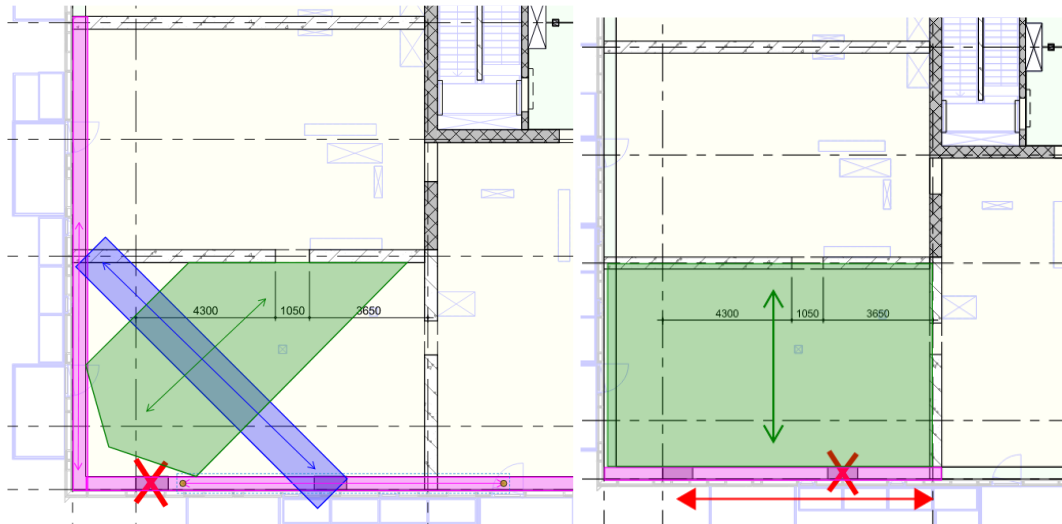
$$A_s = 71319 / (4.8 \cdot 0.500) = 29716 \text{ mm}^2$$

→ 2 lagen 20Ø25-100 in wand + strook 3m Ø20-100 in vloer (L-dsn).

In vervolgfase nader beschouwen.

3.3.6 Element 4: Hoekkolommen 11^e en hoger

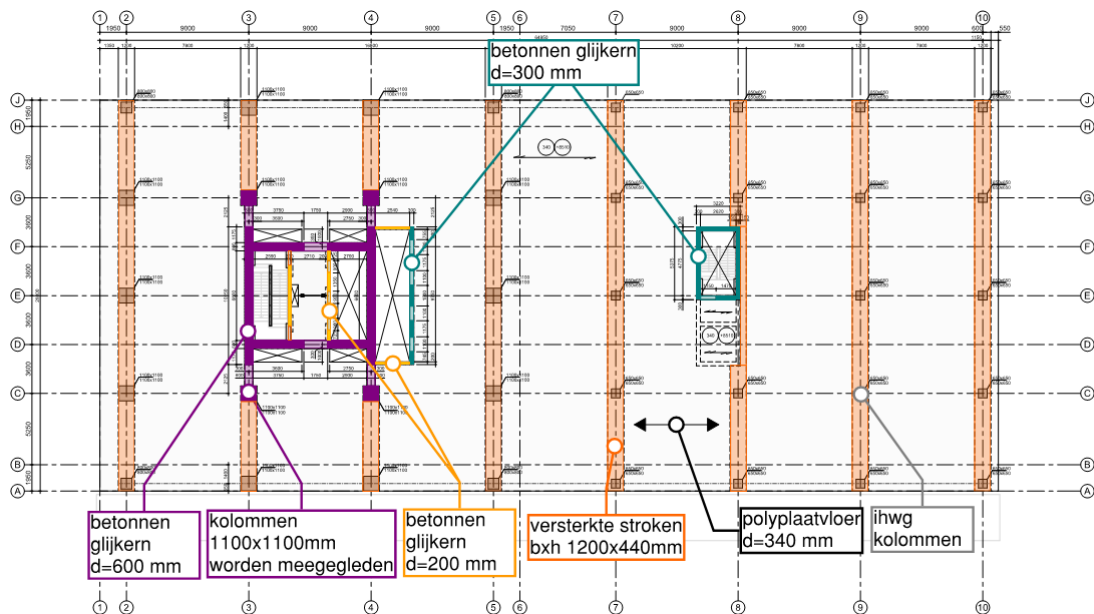
Een alternatieve draagweg voor de hoekkolommen in de hoogbouw wordt via verborgen stroken in de vloeren en de gevelbalken opgelost, zie onderstaande plattegrond. De gevelbalk vormt de alternatieve draagweg bij uitval van de naastliggende kolom.



3.3.7 Element 5: Glijkern toren

De glijkern van de hoogbouwtoren is een kritisch element. De vraag is echter waar de risico's op het verticaal bezwijken van de kern liggen om hiervoor passende maatregelen te treffen.

De kern bestaat uit monoliete betonwanden van 600 mm dik in een H-vorm en staat in centraal in de plattegrond hoogbouwdeel.



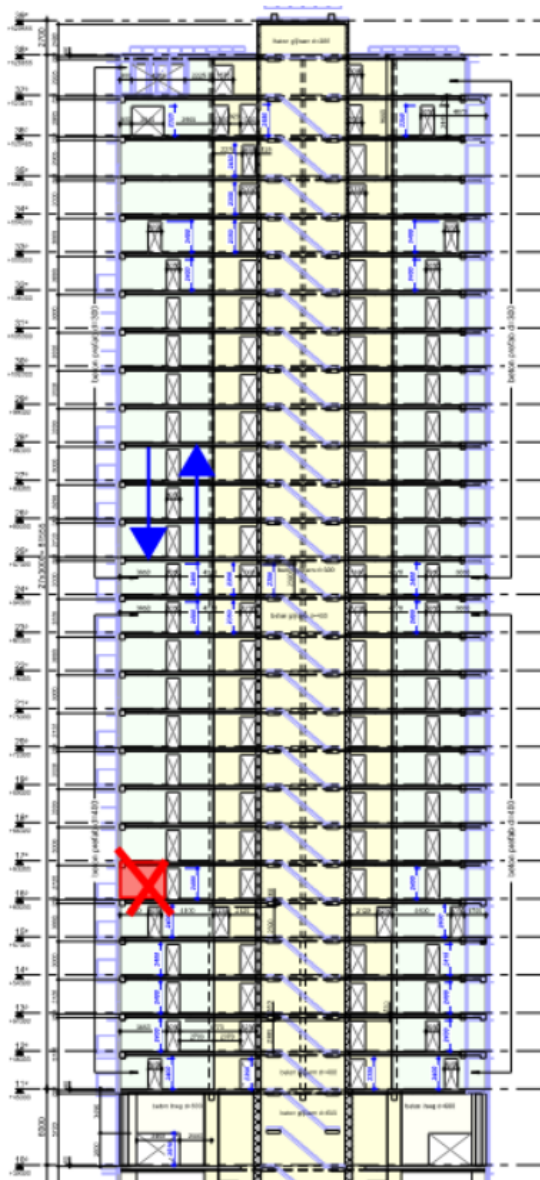
In geval van een buitengewone belasting van buitenaf (bijv. impact van een sportvliegtuig) kan deze de kern moeilijk bereiken of raken door de centrale ligging. Bovendien kan deze slechts één zijde of één hoek van de kern lokaal beschadigen, maar niet de hele kern tot bezwijken brengen.

Bij een buitengewone gebeurtenis binnen het gebouw is de kans op schade aan de kern groter, zeker wanneer de gebeurtenis binnen in het kerndeel zelf plaatsvindt. Hierbij kan gedacht worden aan een interne explosie. In de kern zijn geen explosieve onderdelen aanwezig, dus dit zou alleen met een terroristische aanslag gedaan kunnen worden. Een explosiedruk van 100 kN/m² leidt echter tot een verticale buigspanning in de kern van 0.6 N/mm². Hierdoor treedt nog amper schade op aan de kern. Er zijn dus immense, disproportionele krachten / gebeurtenissen nodig om de kern te laten bezwijken en dit lijkt niet waarschijnlijk dat dit mogelijk is.

Kortom, het wordt niet reëel geacht dat de glijkern als geheel tot bezwijken kan worden gebracht. Om dit in de praktijk te waarborgen wordt de kern zowel horizontaal als verticaal goed gewapend en wordt de wapening in de knopen goed doorgelegd en in elkaar verankerd.

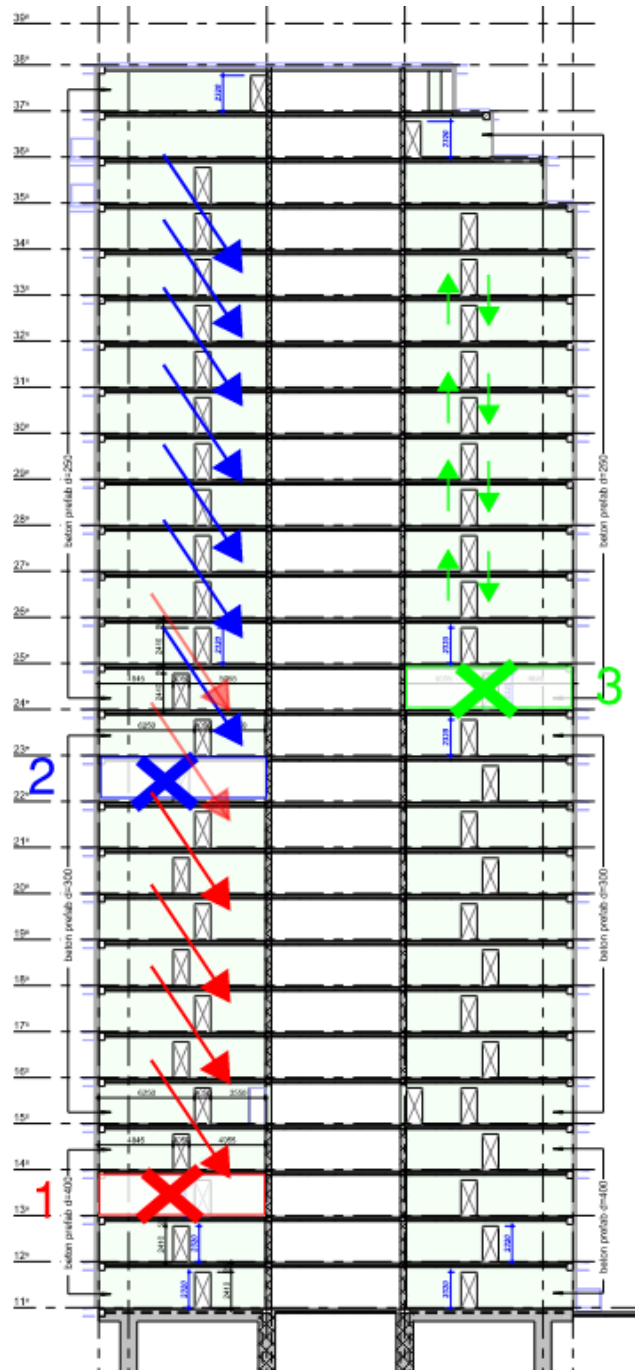
3.3.8 Element 6: Prefab kernwanden as 3 en 4

De alternatieve draagweg bij de uitval van een prefab kernwand op as 3 of 4 kan door de wanden zelf opgenomen worden. Voor de analyse wordt verwezen naar element 1, draagweg 3 en 4.



3.3.9 Element 7: Prefab kernwanden as C, E, G

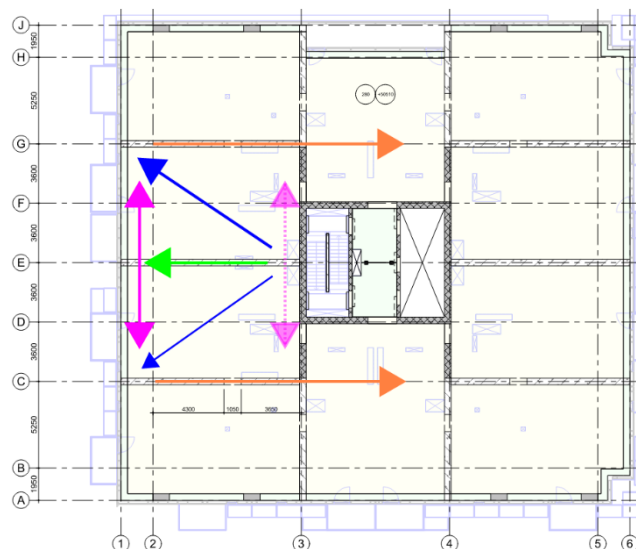
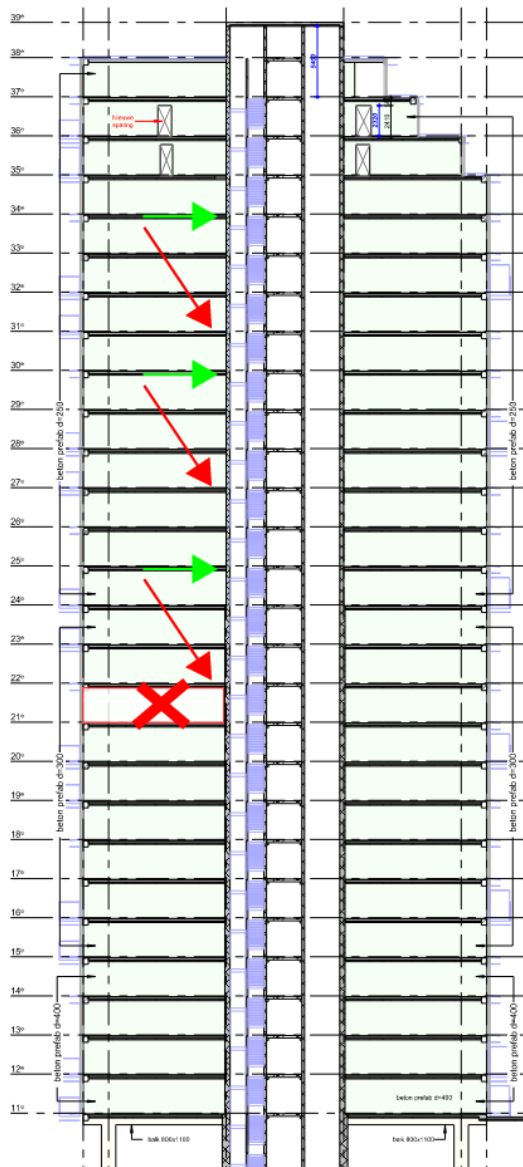
In onderstaande figuur zijn de uitval van 3 verschillende wanden getoond, met bijbehorende alternatieve draagwegen.



Alle draagwegen zijn bij de voorgaande elementen al beschouwd en haalbaar gebleken met praktische wapening.

Wand as E

Er dient een kanttekening gemaakt te worden bij de uitval van een wand op as E. Hoewel deze wanden volledig dicht zijn over de hoogte, zie hieronder, is de vloerschijf niet doorlopend. Deze trekkracht dient daarom in de vloer omgeleid te worden, zie de figuur rechts.



Belasting per verdieping

$$\begin{aligned} \text{Vloer} &= 7.2 \cdot (8.9 + 1.75 \cdot 0.3) = 68 \text{ kN/m} \\ \text{Gevel} &= 7.2 \cdot 3.0 \cdot 1.0 / 11 = 2 \text{ kN/m} \\ \text{Wand} &= (0.4 \cdot 25) \cdot 3.0 = 30 \text{ kN/m} \\ \text{Totaal} &= 100 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Wandlengte ~11m.

$$F_{Ed} = 11 \cdot 100 = 1100 \text{ kN}$$

Trekband wand

Drukdiagonaal $\theta = 60^\circ$.

$$T_i = 1100 / \tan(60) = 635 \text{ kN}$$

$$A_s = 1270 \text{ mm}^2$$

Trekband vloer

$$F_{i,vloer} = T_{i,wand} = 635 \text{ kN.}$$

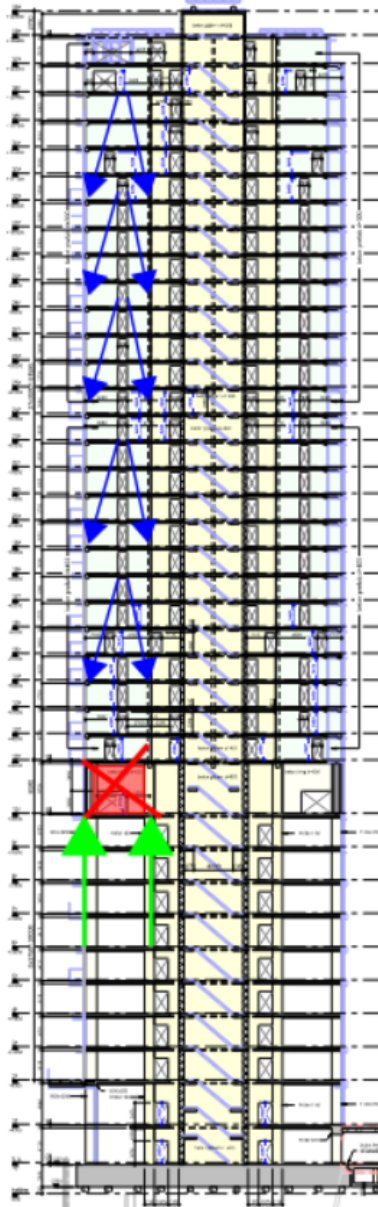
$$T_{i,vloer} = 7.2 / 9 \cdot 635 = 508 \text{ kN}$$

$$A_s = 1028 \text{ mm}^2$$

Alle trekbandwapening is praktisch af te wapenen / grotendeels of al geheel aanwezig in vloerwapening.

3.3.10 Element 8: Overdrachtswand as 3, 4 op 10^e-11^e verdieping

Wanneer de overdrachtswand op as 3-4 op de 10^e verdieping faalt, dan steunen de bovenliggende wanden nog steeds op de haaks daarop staande overdrachtswand op as A of J. Hieronder is de alternatieve belastingafdracht geschetst.



Belasting

$$\begin{aligned} \text{Vloer} &= (4.5) \cdot (9.5 + 1.75 \cdot 0.3) = 45 \text{ kN/m} \\ \text{Wand} &= (0.4 \cdot 25) \cdot 3.0 = 30 \text{ kN/m} \\ \text{Totaal} &= 75 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Toetsing

Trekband T_0

$$\begin{aligned} F_0 &\text{ wordt iedere verdieping afgedragen.} \\ F_0 &= 75 \cdot 7.2 = 540 \text{ kN per verdieping} \\ T_0 &= 540 / \tan(60) = 312 \text{ kN} \\ A_s &= 624 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Trekband T_1

$$\begin{aligned} F_1 &\text{ wordt iedere verdieping afgedragen.} \\ F_1 &= 75 \cdot 5.2 = 390 \text{ kN per verdieping} \\ T_1 &= 390 \cdot (5.2/2) / 3.0 = 338 \text{ kN} \\ A_s &= 676 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Trekband T_2

Als T_0

De wandopeningen bevinden zich nagenoeg in dwarskrachtenuitvalpunt. De lateien hoeven dus geen dwarskracht door buiging in de lateien af te dragen. Wel zijn er trekbanden per verdieping nodig. Hiervoor is de volgende wapening nodig:

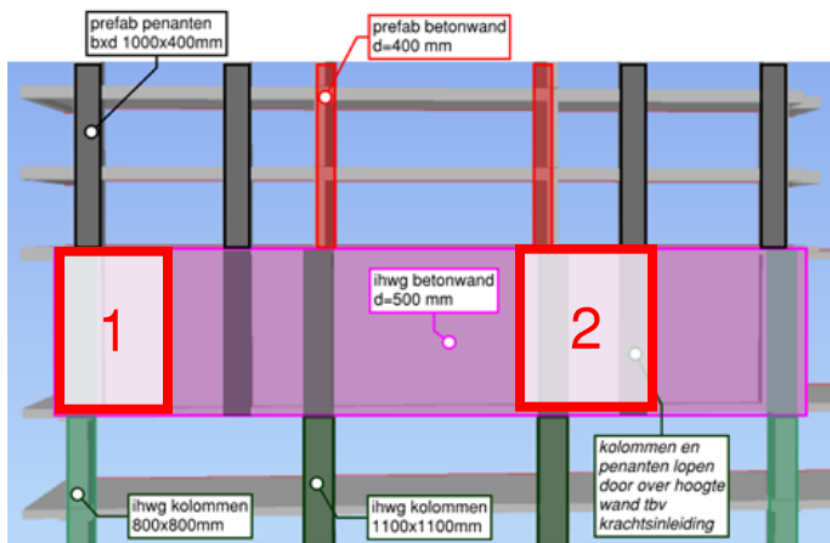
- $\text{Vloer} = (4.5) \cdot (9.5 + 1.75 \cdot 0.3) = 45 \text{ kN/m}$
 $\text{Wand} = (0.4 \cdot 25) \cdot 3.0 = 30 \text{ kN/m}$
 $\text{Totaal} = 75 \text{ kN/m}$
- $V = 75 \cdot 6.6/2 = 250 \text{ kN per verdieping}$
- $T = 250 / \tan(60) = 143 \text{ kN per verdieping}$
- $A_s = 143 / 0.500 = 286 \text{ mm}^2 \rightarrow \text{praktische vloerwapening}$

3.3.11 Element 9: Overdrachtswand as A, J op 10^e-11^e verdieping

Deze wand is toegevoegd voor de robuustheid / alternatieve draagweg en in basis niet nodig voor de primaire draagweg. Het wegvallen van een toevoeging op het primaire systeem is in basis niet relevant. Dit wordt hieronder aangetoond.

Stel de onderstaande denkbeeldige scenario's:

1. Uitval ondersteuning hoekkolom en randkolom verdiepingen 11 en hoger.
2. Uitval ondersteuning prefab wanden as 3/4 en randkolom verdiepingen 11 en hoger.



Scenario 1

Dit scenario is gelijk met het wegvallen van element 4, zie paragraaf 3.3.6 voor de analyse.

Scenario 2

De uitval van de ondersteuning van de prefab wanden as 3/4 is gelijk aan die van element 6, zie paragraaf 3.3.8.

Uitval van de randkolom kan door de gevelbalk opgevangen worden, welke de belasting iedere verdieping naar wand as 3/4 en de hoekkolom draagt.

3.3.12 Element 10: Prefab kernwand trappenhuis

De prefab wanden binnen de kernen van het trappenhuis worden zo gedetailleerd dat deze iedere bouwlaag ondersteund kunnen worden door de bordessen (deze bordessen werken tevens als kniksteun). Het falen van een wand in het trappenhuis kan daarom niet tot voortschrijdende instorting leiden.

3.3.13 Element 11: Verdiepingsvloeren breedplaat

Laag risico, in basis zijn er geen maatregelen nodig. Vloeren worden waar nodig voorzien van opstaande wapening om delaminatie ter plaatse van het kritische voegdetail te voorkomen (structurele fout). Als alternatief kan de vloer in de AGT als een in 1-richting dragende vloer worden getoetst.

3.3.14 Element 12: Verdiepingsvloeren polyplaat

Laag risico, in basis zijn er geen maatregelen nodig. Vloeren worden voor de AGT als 1-richting dragende vloer getoetst, waarbij geen belastingafdracht over de voegen nodig is in verband met het kritische voegdetail van breedplaatvloeren (structurele fout).

3.3.15 Element 13: Trappen/bordessen

De trappen zijn kritische elementen. Wanneer een trap bezwijkt leidt dit niet tot voortschrijdende instorting van de hoofddraagconstructie. Wel is het gevolg dermate groot (vluchtweg) dat er voldoende maatregelen moeten worden getroffen, zodat er gewaarschuwd wordt voordat een element bezwijkt. Brosse bezwijkmechanismen moeten worden uitgesloten.

De bordessen worden voorzien van een alternatieve draagweg via de prefab schalmgatwanden.

3.3.16 Element 14: Balkons

De balkons zijn kritische elementen. Wanneer een balkon bezwijkt leidt dit niet tot voortschrijdende instorting van de hoofddraagconstructie. Wel is het gevolg dermate groot dat er voldoende maatregelen moeten worden getroffen, zodat er gewaarschuwd wordt (vervorming optreedt) voordat een balkon bezwijkt. Brosse bezwijkmechanismen moeten worden uitgesloten. Wanneer de definitieve ontwerp van de balkons bekend is wordt dit verder uitgewerkt.

3.3.17 Element 15: Gevelbalken

Laag risico, geen maatregelen nodig. De gevelbalken hebben wel een functie in de alternatieve draagweg van andere elementen. Dit leidt mogelijk tot extra wapening in de gevelbalk.

4. RER Laagbouw verticaal

4.1 Overzicht elementen

De volgende elementen zijn voor de RER analyse van de laagbouw verticaal gehanteerd.

4.1.1 Kolommen

De volgende kolommen zijn aanwezig in de laagbouw:

- Stalen kolommen 8^e en 9^e verdieping kopgevel
- Midden en randkolommen beton
- Hoekkolommen beton

4.1.2 Wanden

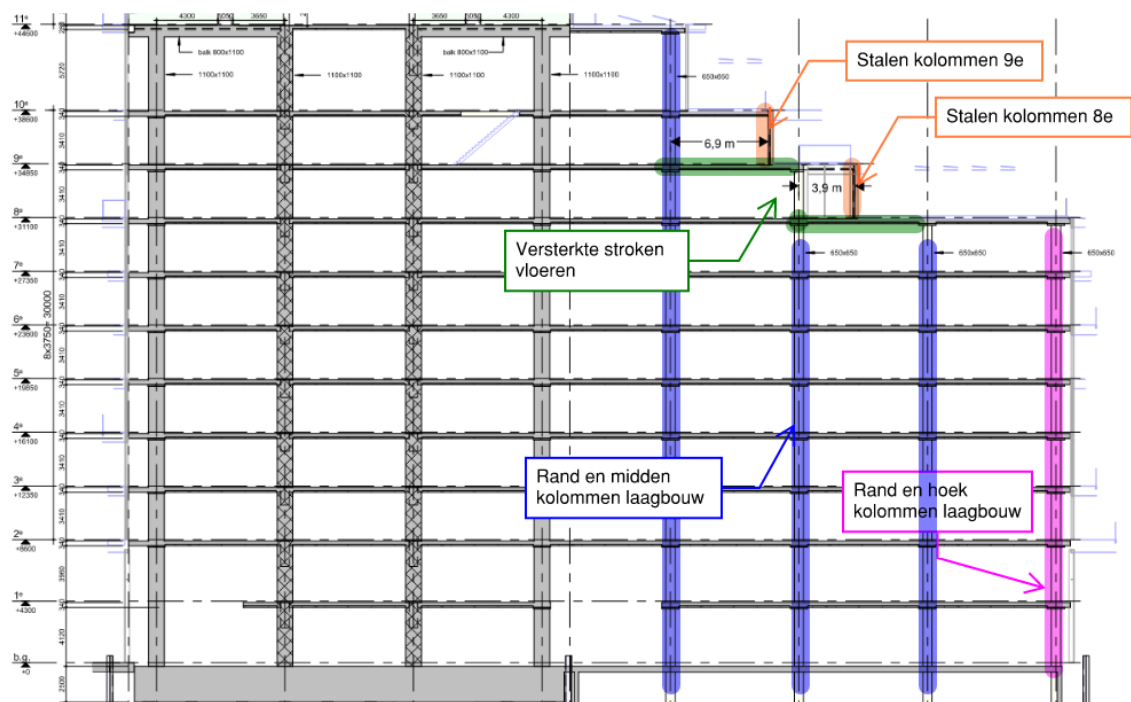
De volgende wanden zijn aanwezig in de laagbouw:

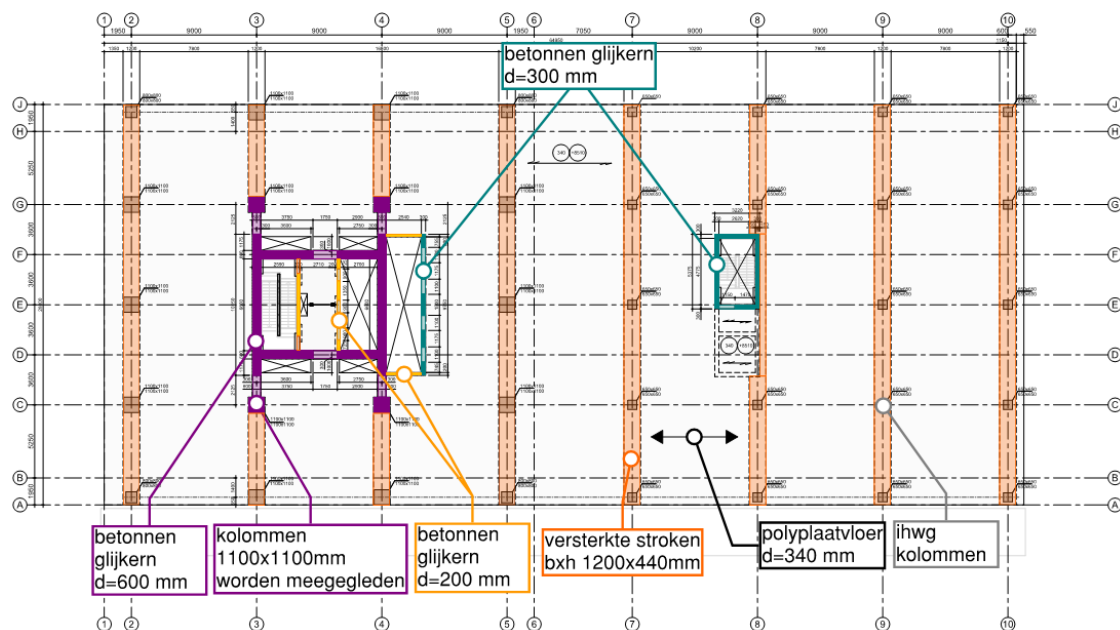
- Glijkern laagbouw

4.1.3 Vloeren/balken

De volgende vloeren/balken zijn aanwezig in de laagbouw:

- Polyplaatvloer
- Versterkte stroken over kolommen (evt. balken)
- Versterkte stroken in vloerelementen
- Trappen/bordessen





4.2 RER analyse

4.2.1 Incasseringsvermogen per element

In onderstaande tabel wordt per element het incasseringsvermogen beoordeeld.

#	Element	Incasserings- vermogen	Toelichting
a	St_Kol_8-9	Gemiddeld	Stalen kolom, doorgaande constructie
b	B_Kol_Mid-Rand	Gemiddeld	In situ kolom, beperkte herverdelingscap.
c	B_Kol_Hoek	Gemiddeld	In situ kolom, beperkte herverdelingscap.
d	Glijkern laagbouw	Zeer groot	In situ, monoliet (ook wapening)
e	Vloeren_polypl	Gemiddeld	Statisch onbepaald (SO), prefab onderschil beperkt ductiliteit vloer
f	VS_kol	Zeer groot	SO, monoliet uitgevoerd.
g	VS_vloer	Gemiddeld	SO, prefab onderschil beperkt ductiliteit
h	Trap_bord	Klein	Statisch bepaald (ligger op 2 st.p.)

4.2.2 Gevolg

In onderstaande tabel wordt per element het gevolg beoordeeld.

#	Element	Gevolg	Toelichting
a	St_Kol_8-9	Klein	A _{vloer} : 10 m ² , 1 bouwlaag
b	B_Kol_Mid-Rand	Zeer groot	Draagt meer dan 6 bouwlagen
c	B_Kol_Hoek	Zeer groot	Draagt meer dan 6 bouwlagen
d	Glijkern laagbouw	Zeer groot	Draagt meer dan 6 bouwlagen
e	Vloeren_polypl	Klein	Per stramien A _{vloer} : 65m ² (3%), 1 bouwlaag
f	VS_kol	Gemiddeld	A _{vloer} : 130m ² (7%), 1 bouwlaag
g	VS_vloer	Klein	A _{vloer} : 75m ² (5%), 2 bouwlagen
h	Trap_bord	Klein	Beperkt aantal personen in trappenhuis.

4.2.3 Risico

Hieronder worden de risico profielen van de elementen bepaald.

Zeer groot	d		b,c	
Groot				
Gemiddeld	f			
Klein			a,e,g	h
Gevolg	Zeer groot	Groot	Gemiddeld	Klein
	Incasseringsvermogen			

4.3 Maatregelen

4.3.1 Maatregelen bij omzetten VO naar DO

In het DO zijn de volgende onderdelen toegevoegd of gewijzigd met het oog op robuustheid:

1. Kanaalplaten met THQ zijn polyplaat met in situ balken geworden.
2. Stabiliteitswand is stabiliteitskern geworden.

4.3.2 Maatregelen o.b.v. RER

Bij de strategie is de kleur uit de RER-analyse overgenomen, maar is in tekst de toegepaste strategie aangegeven. De gekozen strategie in de tekst kan afwijken van de kleur.

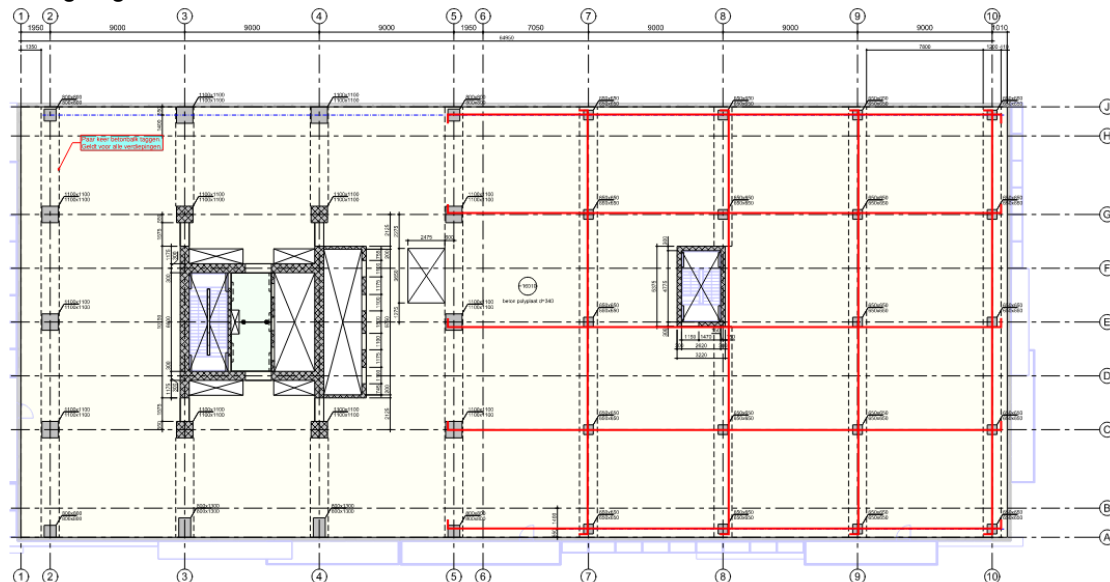
#	Element	Strategie	Maatregel
a	St_Kol_8-9	NVT	-
b	B_Kol_Mid-Rand	R2	Alternatieve draagweg met verzwaarde trekbanden
c	B_Kol_Hoek	R3	Kwalitatieve risico analyse
d	Glijkern laagbouw	G2	Kritisch element
e	Vloeren_polypl	NVT	Vloeren berekening met kinderbalken-moerbalken methode (structurele fout).
f	VS_kol	NVT	-
g	VS_vloer	NVT	-
h	Trap_bord	G2	Bordes en trappen: kritisch element (geen hdc ⁶)

Alleen de elementen b, c, e en h hebben maatregelen nodig. In de volgende paragrafen wordt de haalbaarheid van deze maatregelen onderzocht.

⁶ Het wegnemen van het element leidt niet tot voortschrijdende instorting omdat het element geen onderdeel van de hoofddraagconstructie is.

4.3.3 Element b: Midden en randkolommen beton

Voor de midden en randkolommen dient een trekband aangebracht te worden als alternatieve draagweg.

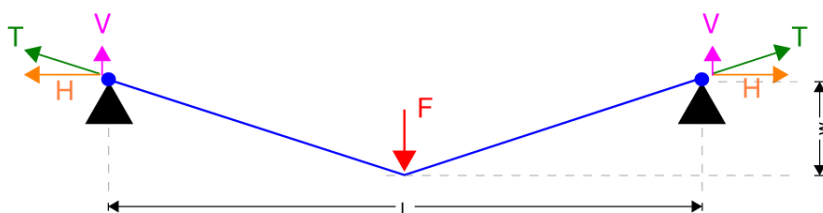


De volgende krachten moeten minimaal volgens [2] door trekbanden kunnen worden opgenomen:

1. Interne trekband: $T_i = 0.8 \cdot (7.55 + 0.3 \cdot 5.0) \cdot 7.2 \cdot 9.0 = 469 \text{ kN} > 75 \text{ kN}$
2. Trekband omtrek: $T_i = 0.4 \cdot (7.55 + 0.3 \cdot 5.0) \cdot 7.2 \cdot 9.0 = 235 \text{ kN} > 75 \text{ kN}$

De trekkracht in een kabel kan uit de zakking berekend worden:

- F = verticale belasting op trekband
- $V = F/2$
- Momentevenwicht halve kabel: $w \cdot H = (L/2) \cdot V \rightarrow H = V \cdot L / (2w) = F \cdot L / (4w)$
- $T = \sqrt{V^2 + H^2} = \sqrt{[(F/2)^2 + (L \cdot F / (4w))^2]} = F/2 \cdot \sqrt{1 + L^2 / (4w^2)}$
- EC-1-7 geeft voor $T = 0.8 \cdot F$. Hieruit volgt: $L/w = 2.5$, ofwel $w = 0.4 \cdot L$.



Tevens kan de rek in de kabel vastgesteld worden door:

- $\epsilon = \Delta L / L = \{ \sqrt{w^2 + (L/2)^2} - (L/2) \} / (L/2) = \sqrt{1 + 4w^2/L^2} - 1$

Uitgaande van de minimale trekband van [2] geeft dit:

- $L = 2 \cdot 9 = 18 \text{ m}$
- $w = 0.4 \cdot L = 0.4 \cdot 18 = 7.2 \text{ m} > \text{vrije hoogte van } 3.4 \text{ m.}$
- $\epsilon = 0.28 = 28\% \text{ (} w/L = 0.4 \text{)}$

Om de trekband nog te kunnen laten functioneren, mag de rek van de wapening bij B500B niet groter zijn dan $\epsilon_{uk} = 5\%$ (zie tabel C.1 van NEN-EN 1992-1-1). De minimale trekband van de norm [2] kan in dit geval niet als alternatieve verticale draagweg fungeren, omdat de wapening onvoldoende vervormingscapaciteit heeft ($28\% \gg 5\%$). Wel kan een dergelijke trekband de samenhang in de constructie vergroten.

Voor dit project is het doel om trekbanden toe te passen voor een alternatieve verticale draagweg. De vraag is echter welke rek in de trekband toelaatbaar is, omdat de grootste rek in de scheuren optreedt en niet tussen de tussen scheuren. Dit verlaagd de gemiddelde rek in de trekband, zie de figuur linksonder. Deens onderzoek⁷ heeft uitgewezen dat er een relatie bestaat tussen het wapeningspercentage en gemiddeld toelaatbare rek en heeft hiervoor een experimenteel gevalideerd model voor ontwikkeld (model 2 in figuur rechtsonder).

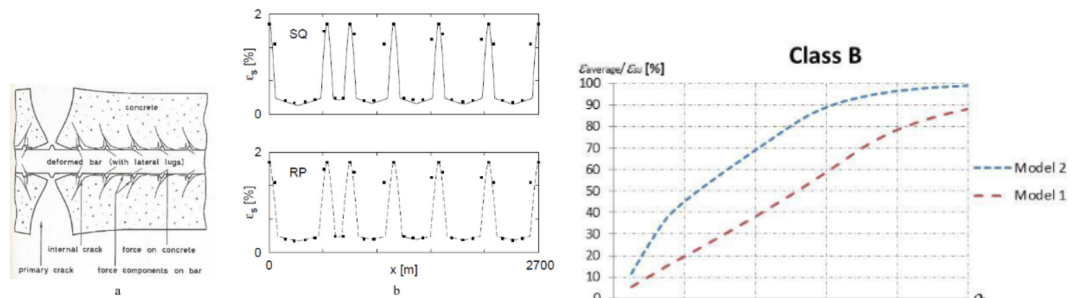


Fig. 3. (a) conical internal cracks [3] (b) strain distribution in reinforcement in beams [2].

Stel we gaan uit van een geschat wapeningspercentage ter plaatse van de trekband en vloerwapening van $\rho_s=0.8\%$. De maximaal toelaatbare rek is dan $\epsilon_{ave}/\epsilon_u = 40\%$, ofwel $\epsilon_{ave} = 0.4 \cdot 5\% = 2\%$. De maximale doorbuigingsverhouding mag niet groter zijn dan $w/L = 0.1$ om de rek onder de 2% te houden.

Er worden in het Tree House trekbanden in beide richting toegepast. De kleinste overspanning is $2 \times 7.2\text{m}$, waardoor de maximale doorbuiging van de trekband $w=0.1 \cdot 14.4=1.44\text{m}$ mag zijn. Wanneer hierop de trekbanden gedimensioneerd worden geeft dit:

- Evenwijdig aan letterassen:
 - $L = 2 \times 9 = 18\text{ m}$
 - $L/w = 18/1.44 = 12.5$
 - Per kabel moet de halve belasting opgenomen worden, dus $F/2$.
 - $T = F/2 \cdot \sqrt{1 + L^2/(4w^2)} / 2 = 1.6F$
- Evenwijdig aan cijferassen:
 - $L = 2 \times 7.2 = 14.4\text{ m}$
 - $L/w = 14.4/1.44 = 10$
 - Per kabel moet de halve belasting opgenomen worden, dus $F/2$.
 - $T = F/2 \cdot \sqrt{1 + L^2/(4w^2)} / 2 = 1.3F$

Bovenstaande analyse geldt ook voor een randkolom. De trekband werkt slechts in 1 richting, maar heeft de halve belasting ten opzichte van een middenkolom. Dit heft elkaar op.

Kortom, de volgende trekbanden moeten worden toegepast:

- $F = (7.55+0.3 \cdot 5.0) \cdot 7.2 \cdot 9.0 = 586\text{ kN}$
- Letterassen: $A_s = 1.6 \cdot 586 / 0.500 = 1875\text{ mm}^2$
- Cijferassen: $A_s = 1.3 \cdot 586 / 0.500 = 1524\text{ mm}^2$

Voor de trekband kan de aanwezige vloerwapening ook gebruikt worden. De extra benodigde wapening moet dan in een smalle strook aangebracht worden om het wapeningspercentage van de trekstaaf zo goed mogelijk te benutten.

⁷ Strain capacity of reinforced concrete members subjected to uniaxial tension. L.G. Hagsten, A.B. Rasmussen, J. Fisker, Procedia Engineering, December 2017.

4.3.4 Element c: Hoekkolommen beton

De hoekkolommen kunnen niet voorzien worden van een alternatieve draagweg, maar bezwijken geeft wel een dusdanig groot gevolg dat dit voorkomen moet worden. Daarom is deze aangemerkt als kritisch element (G2) en hiervoor worden de volgende maatregelen getroffen:

- Waarschuwen voor bezwijken:
 - Bros bezwijken op dwarskracht uitsluiten.
 - $UC_{Moment} > UC_{Dwarskracht}$
- Explosie:
 - Explosiedruk: $p = 34 \text{ kN/m}^2$
 - Gevel draagt belasting deels aan kolom over:
 - $H_x = A_{gevel} \cdot 34 = (7.2/2 \cdot 3.4/2) \cdot 34 = 210 \text{ kN}$
 - $H_y = A_{gevel} \cdot 34 = (9.0/2 \cdot 3.4/2) \cdot 34 = 260 \text{ kN}$
- Kolom op begane grond dimensioneren op aanrijding, zonder remweg i.v.m. terroristische aanslag (zie 6.2):
 - $H_{0x} = 1000 \text{ kN}$
 - $H_{0y} = 500 \text{ kN}$
 - Aanrijdhoogte is 1.5m (vrachtwagen)
- Kolom met hogere materiaalfactor berekenen in UGT.
- Inspectie door coördinerend constructeur voor stort wapening.

4.3.5 Element d: Glijkern laagbouw

Als glijkern hoogbouw, paragraaf 3.3.7.

4.3.6 Element e: Verdiepingsvloeren polyplaat

Laag risico, in basis zijn er geen maatregelen nodig. Vloeren worden voor de AGT als 1-richting dragende vloer getoetst, waarbij geen belastingafdracht over de voegen nodig is in verband met het kritische voegdetail van breedplaatvloeren (structurele fout).

4.3.7 Element h: Trappen/bordessen

De trappen en bordessen zijn kritische elementen. Wanneer een trap of bordes bezwijkt leidt dit niet tot voortschrijdende instorting van de hoofddraagconstructie. Wel is het gevolg dermate groot (vluchtweg) dat er voldoende maatregelen moeten worden getroffen, zodat er gewaarschuwd wordt voordat een element bezwijkt. Brosse bezwijkmechanismen moeten worden uitgesloten.

5. RER Horizontaal

5.1 Elementen

Voor het beoordelen van de risico's bij horizontaal bezwijken kunnen in zowel de hoogbouw als de laagbouw de onderstaande elementen beschreven worden. De hoogbouw en de laagbouw worden integraal beschouwd, omdat deze elkaar voor de stabiliteit beïnvloeden.

Zie paragraaf 3.1 voor figuren van de onderstaande de onderdelen.

5.1.1 Kolommen

De volgende kolommen in de hoogbouw zijn te onderscheiden:

1. Kolommen bg t/m 10^e onder kernwanden as 3 en 4
2. Kolommen bg t/m 10^e onder kernwanden as C, E G

De kolommen dragen zelf geen horizontale belasting af, maar doen wel mee als “flens” van de kernwanden in de hoogbouw, welke als een soort outrigger functioneert. Daarom zijn deze in de beoordeling meegenomen. De hoekkolommen en de kolommen van de laagbouw fungeren niet als flens en zijn daarom niet meegenomen in de beschouwing voor horizontaal bezwijken.

5.1.2 Wanden

De volgende wanden zijn te onderscheiden:

3. Glijkern toren
4. Prefab kernwanden as 3 en 4
5. Prefab kernwanden as C, E, G
6. Glijkern laagbouw

De overdrachtswanden zijn aangebracht voor de verticale belastingafdracht en hebben geen primaire functie voor de horizontale belastingafdracht en/of stabiliteit. Deze zijn daarom buiten beschouwing gelaten. Hetzelfde geldt voor de prefab wanden in de trappenhuisen.

Vanuit de laagbouw zijn wel de kernwanden toegevoegd.

5.1.3 Vloeren/balken

De verdiepingsvloeren zijn buiten beschouwing gelaten, omdat deze in de beoordeling van de andere onderdelen tot uiting komen (middels de beoordeling van de vloerschijf). Deze nogmaals beoordelen voegt niets toe.

Trappen, bordessen, balkons en gevelbalken hebben geen functie voor het horizontaal bezwijken. Deze zijn daarom buiten de beschouwing gelaten.

5.2 RER analyse

5.2.1 Incasseringsvermogen per element

In onderstaande tabel wordt per element het incasseringsvermogen beoordeeld.

#	Element	Incasserings- vermogen	Toelichting
1	Kol_0-10_3-4	Zeer groot	In situ, doorgaand (ook wapening)
2	Kol_0-10_C-G	Zeer groot	In situ, doorgaand (ook wapening)
3	Glijkern toren	Groot	2-voudig SO met kern laagbouw Monoliete vloerschijf bij laag en hoogbouw
4	Prefab_kw_3-4	Zeer groot	Meervoudig SO (meerdere kernwanden op één as) en monoliete vloerschijf
5	Prefab_kw_C-E-G	Zeer groot	Meervoudig SO (meerdere kernwanden op één as) en monoliete vloerschijf
6	Glijkern laagbouw	Groot	2-voudig SO (zie ook 3)

5.2.2 Gevolg

In onderstaande tabel wordt per element het gevolg beoordeeld.

#	Element	Gevolg	Toelichting
1	Kol_0-10_3-4	Gemiddeld	Kolommen stabiliseren hoogbouwdeel kern ($>10^e$ verd = $\sim 50\%F_{vert}$). Per kolom is dit 1/4 van de hoogbouw, dus $13\%F_{vert}$.
2	Kol_0-10_C-G	Gemiddeld	Kolommen stabiliseren hoogbouwdeel kern ($>10^e$ verd = $\sim 50\%F_{vert}$). Per kolom is dit 1/6 van de hoogbouw, dus $8\%F_{vert}$.
3	Glijkern toren	Zeer groot	Binnenkern stabiliseert ca. $75\%F_{vert}$.
4	Prefab_kw_3-4	Gemiddeld	Als element 1 ($13\%F_{vert}$).
5	Prefab_kw_C-E-G	Gemiddeld	Als element 2 ($8\%F_{vert}$).
6	Glijkern laagbouw	Groot	Kernwanden stabiliseren ca. $25\%F_{vert}$

5.2.3 Risico

Hieronder worden de risico profielen van de elementen bepaald.

Zeer groot		3		
Groot		6		
Gemiddeld	1,2,4,5			
Klein				
Gevolg	Zeer groot	Groot	Gemiddeld	Klein
	Incasseringsvermogen			

5.3 Maatregelen

5.3.1 Maatregelen bij omzetten VO naar DO

In het DO zijn de volgende onderdelen toegevoegd of gewijzigd met het oog op robuustheid (alleen de relevante voor de stabiliteit zijn genoemd):

1. Kanaalplaten met THQ zijn polyplaat met in situ balken geworden.
2. Scheve kolommen recht gezet (geen trekbanden voor evenwicht = risico).
3. Prefab wanden hoogbouw. Deze geeft door de doorgaande monoliete vloerschijf geen vermindering van de horizontale robuustheid.
4. Stabiliteitswand is stabiliteitskern in de laagbouw geworden.

5.3.2 Maatregelen o.b.v. RER

Bij de strategie is de kleur uit de RER-analyse overgenomen, maar is in tekst de toegepaste strategie aangegeven. De gekozen strategie in de tekst kan afwijken van de kleur.

#	Element	Strategie	Maatregel
1	Kol_0-10_3-4	NVT	-
2	Kol_0-10_C-G	NVT	-
3	Glijkern toren	G2	Ductiel gedrag waarborgen
4	Prefab_kw_3-4	NVT	-
5	Prefab_kw_C-E-G	NVT	-
6	Glijkern laagbouw	G2	Ductiel gedrag waarborgen

Alleen de elementen 3 en 6 hebben maatregelen nodig. Voor beide onderdelen wordt ductiel detailleren als maatregel gesteld. In de volgende paragraaf wordt de haalbaarheid van deze maatregel onderzocht / verder uitgewerkt.

5.3.3 Elementen 3 en 6

Voor de glijkernen wordt ductiel gedrag als maatregel voorgeschreven. Om dit te bereiken wordt het volgende voorgesteld:

- Bros bezwijken lateien uitsluiten. De lateien zorgen voor de samenwerking van de kerndelen en daarmee de sterkte en stijfheid/stabiliteit van het gebouw. Bros bezwijken van de lateien wordt voorkomen (dwarskrachtcapaciteit latei > momentcapaciteit latei). Dit vergroot ook de herverdelingscapaciteit van krachten over de verschillende lateien.
- Kernwapening moet minimaal het scheurmoment kunnen opnemen in die delen waar de kern gescheurd is ($\rho = 0.5 \cdot f_{ctm} / f_{y,d} \cdot 100\% = 4.21 / 435 \cdot 100\% = \sim 0.5\%$ over het gescheurde deel uitgaande van C55/67).
- Bros bezwijken kernen op dwarskracht voorkomen.

6. Bekende buitengewone belastingen

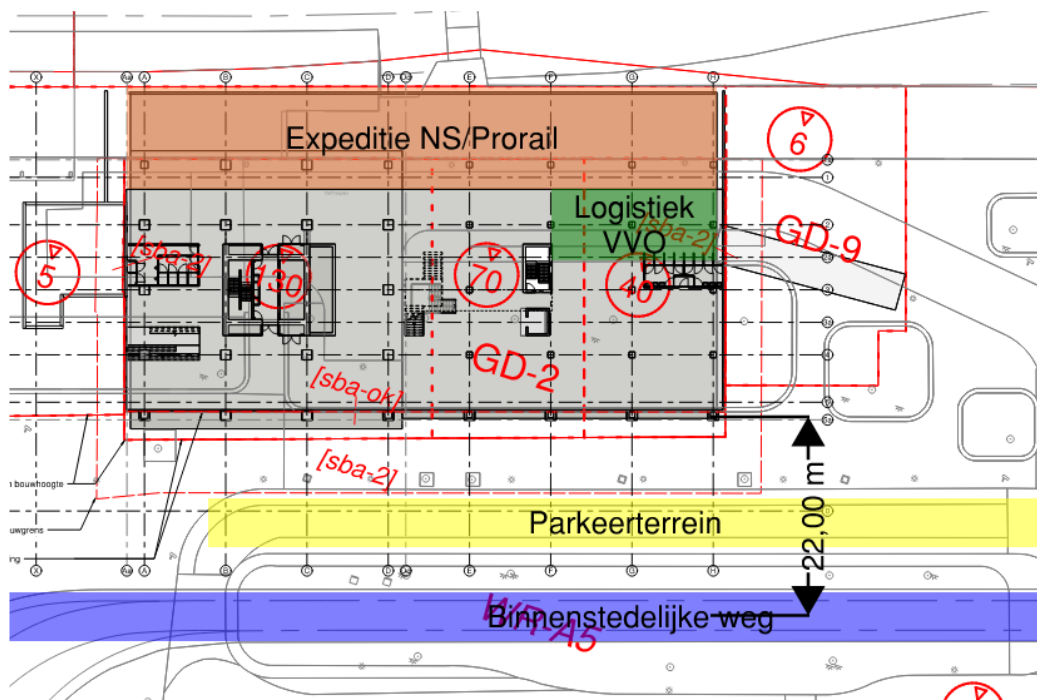
6.1 Explosies

Explosies zijn al behandeld in de RER analyse van de diverse onderdelen.

6.2 Aanrijdbelasting

6.2.1 Voertuigen

In onderstaande figuur zijn de omliggende wegen aangegeven.



De expeditie van de NS/Prorail en de logistiek VVO is een binnenplaats waar gereden kan worden met vrachtwagens >3.5 ton. Volgens [7] geldt:

- $F_{dx} = 200 \text{ kN}$
- $F_{dy} = 100 \text{ kN}$
- $d_b = 5 \text{ m}$

De binnenstedelijke weg ligt 22 m van het gebouw af. Hiervoor geldt:

- $d_b = 10 \text{ m} \rightarrow \sqrt{(1-d/d_b)} = \sqrt{(1-22/10)} = 0$
- $F_{0x} = 1000 \text{ kN} \rightarrow F_{dx} = F_{0x} * \sqrt{(1-d/d_b)} = 1000 * 0 = 0 \text{ kN}$
- $F_{0y} = 500 \text{ kN} \rightarrow F_{dy} = F_{0y} * \sqrt{(1-d/d_b)} = 500 * 0 = 0 \text{ kN}$

Er hoeft dus geen aanrijdbelasting van de rijweg in rekening gebracht te worden.

6.2.2 Treinen

Aan de noordzijde van het Tree House bevindt zich de perrons het spoor van Rotterdam CS. Stootbelastingen als gevolg van ontsporing van treinen hoeft niet in rekening te worden gebracht als de constructieve elementen effectief zijn beschermd door ontsporingseleidingen, op zichzelf staande beschermingsconstructies of perrons (zie 4.5.1.4 (2) uit [2]). Het Tree House wordt in dit geval beschermd door de perrons.

6.2.3 Trams

Aan de zuidzijde van het Tree House bevindt zich een trambaan. De trambaan ligt nog iets zuidelijker dan de binnenstedelijke weg en is meer dan 20 meter verwijderd van het gebouw. Tabel NB.4 – 4.4 van [2] geeft aan dat voor gebouwen verder dan 10 meter van het spoor geen stootbelastingen meer in rekening hoeven te worden gebracht. Er hoeven daarom geen stootbelastingen als gevolg van een ontspoorde tram op het Tree House gerekend te worden.