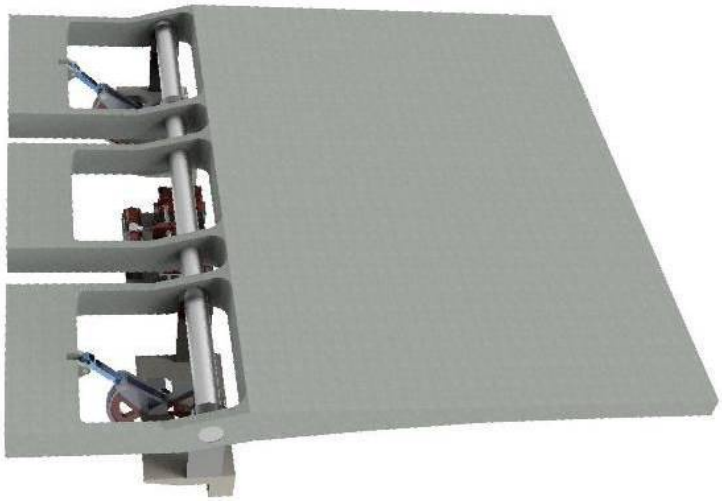
Gemeente Amsterdam

Hogeschool van Amsterdam
Amsterdam University of Applied Sciences

Renovatie van de Berlagebrug

Vernieuwen van het bewegingswerk



Auteur

[redacted]

500689892

Opdrachtgever

[redacted]

Ingenieursbureau Gemeente Amsterdam

POP-Coach

[redacted]

Hogeschool van Amsterdam – Engineering, Design & Innovation

Definitief

Versie 1

12 juni 2017

Voorwoord

De scriptie dat voor u ligt, Renovatie van de Berlagebrug, is geschreven in het kader van mijn afstuderen voor de opleiding Engineering, Design and Innovation aan de Hogeschool van Amsterdam.

Van maart tot en met juni 2017 heb ik mij bezig gehouden met het onderzoeken en ontwerpen van nieuwe mogelijkheden van het bewegingswerk voor de Berlagebrug. Met geen kennis over bruggen en beweegbare bruggen nam ik de uitdaging aan. Ik kan dan ook zeggen dat het niet altijd gemakkelijk ging. Maar heb er erg veel van geleerd.

Deze scriptie is in opdracht van het Ingenieursbureau van Amsterdam met begeleiding van [redacted]

Het eindresultaat zou niet mogelijk zijn geweest zonder de fijne begeleiding en ondersteuning van mijn begeleiders. Ik wil daarom [redacted] en [redacted] POP-Coach Hogeschool van Amsterdam, enorm bedanken.

Verder wil ik mijn andere collega's bij het IB bedanken. Voor het creëren van een fijne werksfeer, de gezelligheid en de betrokkenheid.

Ten slotte wil ik andere betrokkenen bedanken die direct, of indirect, mij hebben gesteund tijdens mijn afstudeerperiode. Met name mijn familie en vrienden.

Ik wens u veel leesplezier toe.

[redacted]

Amsterdam, 12 juni 2017

Samenvatting

Het Ingenieursbureau Gemeente Amsterdam (IB) biedt oplossingen aan voor civiele constructies waaronder vaste- en beweegbare bruggen. Op dit moment moeten oude bruggen gerenoveerd worden door vernieuwde eisen en normen. De Berlagebrug is er één van. De Berlagebrug, verbinding voor al het verkeer tussen de Rivierenbuurt en Weesperzijde, is in 1931-1932 ontworpen door de architect H.P. Berlage. Omdat de eisen en normen wettelijk zijn, moet de brug gerenoveerd of vervangen worden om aan deze nieuwe eisen te voldoen. Renovatie van het val en bewegingswerk is uit kostenoverweging niet aantrekkelijk. Daarom is het gunstigst deze in zijn geheel te vervangen. Echter is het nog niet duidelijk of de nieuwe moderne aandrijvingen in de huidige basculekelder geplaatst kunnen worden.

Het doel is om eind juni 2017 een conceptueel ontwerp te leveren van moderne aandrijvingen van de Berlagebrug die in de huidige basculekelder geplaatst kunnen worden. IB zal dan meer inzicht in de mogelijkheden krijgen.

De onderzoeksvraag van het onderzoek luidt als volgt: 'Hoe kunnen de moderne aandrijving en de vernieuwde brug, die voldoen aan de huidige eisen, aangesloten worden op de bestaande basculekelder van de Berlagebrug?'

Voor het onderzoek wordt de focus gelegd op het brugval en de kelder van de Berlagebrug. Er is voornamelijk gebruik gemaakt van literatuuronderzoek. Verder is er tijdens de afstudeerperiode verschillende locaties bezocht om meer inzicht te krijgen van de mogelijkheden. Allereerst is er onderzoek gedaan naar de normen en eisen: voorschriften voor het ontwerpen van beweegbare bruggen (VOBB). Hieruit is gekomen dat er veel factoren zijn aangepast, voornamelijk voor het berekenen van de belastingen en het bewegingswerk. Dit betekent dat de Berlagebrug volgens de nieuwe norm niet meer voldoet aan de (verkeers)belastingen. Verder is er gekeken naar de huidige aandrijvingen. Na de analyse zijn er met behulp van een functieanalyse en morfologisch overzicht drie concepten ontworpen. Deze zijn verwerkt in CAD om te kijken of het in de huidige kelder past. Met een keuzematrix is er uiteindelijk één concept uitgekozen. Namelijk concept 3. Concept 3 heeft de voorkeur gekregen omdat het vrij eenvoudig en robuust is. Het heeft niet veel onderhoud nodig en de kelder en het brugval kunnen grotendeels behouden worden. Voor de detaillering zijn er berekeningen gedaan aan het bewegingswerk. Hiermee zijn de onderdelen uitgekozen. De gekozen onderdelen zijn verwerkt in Inventor en zijn vervolgens als een assembly verwerkt. Het uitgewerkte concept is geleverd met onderdelenlijst.

Uiteindelijk is concept 3 als beste gebleken. Echter betekent dat niet dat de andere concepten al meteen worden uitgesloten. Het is aanbevolen om alle drie de concepten nog mee te nemen in het vervolgproces en voor te leggen aan de stakeholders. Ten slotte moet het concept nog verder gedetailleerd worden. Omwille van de tijd zijn alleen de hoofdaandrijvingen bepaald.

Begrippen en afkortingen

IB	Ingenieursbureau Gemeente Amsterdam.
VOBB	Voorschriften voor het ontwerpen van beweegbare bruggen.
Het brugval	Het beweegbare gedeelte van de basculebrug.
Basculebrug	Een beweegbare brug dat een rotatie om de horizontale y-as maakt als bewegingsrichting.
NAP	Normaal Amsterdams peil.
Bovenbouw (brug)	Het bovenste gedeelte van een brug waarover het verkeer gaat.
Onderbouw (brug)	Onderste gedeelte van een brug en bestaat uit funderingen en pijlers.
Pijlers	Verticale ondersteuningen van een brug.
Landhoofd	Vormt de overgang van het vaste land en een brug.
Ballast	Contragewicht van een brug.
Centraal lierwerk	Hoofdaandrijvingen.
Orthotroop	Een materiaal is otrhotroop wanneer materiaaleigenschappen anders zijn in meerdere (loodrechte) richtingen.
Bordes	Een verhoogde platform dat bereikbaar is via trappen.
pv;eg	Representatieve waarde van het variabel dekgewicht.
*S*mom	Is het statisch moment (m_3) van het door de wind getroffen oppervlak van het val ten opzichte van de draaiingsas van de brug.
Mw;brug	Windbelasting
cs	Is de afmetingsfactor.
cd	Is de dynamische factor.
*C*t	Is de windvormfactor.
Qp	Is de stuwdruk.
ρ	Is de luchtdichtheid.
vm	Is de 10 minuten gemiddelde windsnelheid op 10 meter hoogte boven maaiveld gemeten.
Ze	Referentiehoogte van het val t.o.v. de waterstand (NAP)
Zo	Is de ruwheidslengte bepaald in VOBB 2016.
Zvw	Is de hoogte boven het maaiveld waarop de 10 minuten gemiddelde windsnelheid (vm) is bepaald.
Fval	Kracht van het eigengewicht van het val.
Fball	Kracht van het ballastgewicht.
Fonbelans	Kracht van de onbalans van het val.
Fveg	Kracht van het variabel dekgewicht.
Fr	Wrijvingskracht.
I/i	Overbrengingsverhouding.

Inhoud

1 Inleiding 7

2 Oriëntatie 8
2.1 Ingenieursbureau Gemeente Amsterdam (IB) 8
2.2 Probleemstelling 9
2.2.1 Doelstelling 9
2.2.2 Onderzoeks- en deelvragen 9
2.3 Scope 10

3 Resultaten 11
3.1 Analyse 11
3.1.1 Vaste- en beweegbare bruggen 11
3.1.2 De Berlagebrug 12
3.1.3 Eisen voor beweegbare bruggen 15
3.1.4 Belastingen en krachten 17
3.1.5 Aandrijvingen 20
3.1.6 Programma van Eisen 22
3.2 Ontwerp 24
3.2.1 Functieanalyse 24
3.2.2 Morfologisch overzicht 24
3.2.3 Concepten 26
3.2.4 Keuzematrix 29
3.3 Detaillering 30
3.3.1 Werking 31
3.3.2 Berekening 31
3.3.3 Onderdelenlijst 36

4 Conclusies en aanbevelingen 37
4.1 Conclusie 37
4.2 Aanbevelingen 37

Bijlage(n) 39
Bijlage 1 - Vaste bruggen 40
Bijlage 2 - Onderdelen van het val 41
Bijlage 3 - Belangrijke eisen VOBB 45
Bijlage 4 - Verschillen NEN 6786 (VOBB) 47
Bijlage 5 - Evenwichtsberekening 50
Bijlage 6 - Berekeningen belastingen & krachten 56
Bijlage 7 - Keuzematrix 59
Bijlage 8 - Tabel 11 VOBB 2016 60
Bijlage 9 - Berekeningen bewegingswerk 61

Figuren en tabellen

Figuur 2.1: locatie van de Berlagebrug 10
Figuur 2.2: basculekelder met aandrijvingen 10
Figuur 3.1: schematische weergave van een brug 11
Figuur 3.2: de Berlagebrug 12
Figuur 3.3: verticale doorsnede van de basculekelder van de Berlagebrug 13
Figuur 3.4: centraal lierwerk van de Berlagebrug 14
Figuur 3.5: bovenaanzicht van de basculekelder van de Berlagebrug 14
Figuur 3.6: verdeling eisen beweegbare bruggen 15
Figuur 3.7: windvormfactor 17
Figuur 3.8: aandrijving van de Koningin Julianabrug 20
Tabel 3.1: programma van eisen 23
Figuur 3.9: functieanalyse van het aandrijvingswerk van de Berlagebrug 24
Figuur 3.10: morfologisch overzicht van het bewegingswerk Berlagebrug 26
Figuur 3.11: boven- en zijaanzicht concept 1 26
Figuur 3.12: boven- en zijaanzicht concept 2 27
Figuur 3.13: boven- en zijaanzicht concept 3 28
Tabel 3.2: totale keuzematrix 29
Figuur 3.14: assembly van het uiteindelijke concept (concept 3) 31
Tabel 3.3: resultaten van de berekende momenten 33
Figuur 3.15: assembly van het uiteindelijke concept met onderdelenlijst 36

1 Inleiding

Ingenieursbureau van Gemeente Amsterdam (IB) biedt oplossingen aan voor civiele constructies, vaste- en beweegbare bruggen. Op dit moment moeten oude bruggen gerenoveerd worden door vernieuwde eisen en normen. De Berlagebrug is er één van. IB heeft voor de Berlagebrug een afstudeerder aangenomen voor verdere onderzoeken.

De afstudeerder, [redacted], zal onder begeleiding van [redacted] een onderzoek uitvoeren naar de Berlagebrug en zijn basculekelder met als eindresultaat een conceptueel ontwerp van een nieuw bewegingswerk voor de Berlagebrug. Dit onderzoek zal IB een beeld geven naar de mogelijkheden en kan gebruikt worden wanneer de renovatie van start gaat.

De onderzoeksvraag van het project luidt als volgt: 'Hoe kunnen de moderne aandrijving en de vernieuwde brug, die voldoen aan de eisen, aangesloten worden op de huidige basculekelder van de Berlagebrug?' Waarin wordt onderzocht hoe de basculekelder eruit ziet en welke aandrijvingen op dit moment aangesloten zijn, welke eisen van belang zijn, wat de mogelijkheden zijn voor de moderne aandrijvingen en hoe dat dan in de huidige kelder geplaatst kan worden.

Als onderzoek is er voornamelijk literatuuronderzoek verricht. Met name deskresearch, NEN6786 (VOBB) en interne documentaties zoals oude berekeningen en archieftekeningen. Verder is gebruik gemaakt van fieldresearch. Er zijn verschillende locaties tijdens de afstudeerperiode bezocht om meer inzicht te krijgen in de mogelijkheden.

In dit verslag wordt in het volgende hoofdstuk de oriëntatie weergegeven. Hierin zal wat achtergrondinformatie worden gegeven over het IB en de probleemstelling. Bij de probleemstelling worden de onderzoeks- en deelvragen herhaalt en wordt er een scope beschreven. Vervolgens zijn de resultaten van het onderzoeksfase, ontwerpfase en detaillering te vinden in hoofdstuk drie. Waarin het uiteindelijke ontwerp te zien is. Ten slotte worden alle bevindingen beschreven in de conclusie met de bijbehorende aanbevelingen.

2 Oriëntatie

2.1 Ingenieursbureau Gemeente Amsterdam (IB)

Het ingenieursbureau behoort tot de cluster 'Ruimte en Economie' van de gemeente Amsterdam. Deze cluster staat voor het creëren van de ruimtelijke en economische randvoorwaarden die nodig zijn om Amsterdam tot een sterke metropool uit te laten groeien.
(Gemeente Amsterdam, sd)

Het ingenieursbureau bereidt de aanleg en het onderhoud van infrastructuur en inrichting van de stad voor. Het ingenieursbureau ondersteunt opdrachtgevers bij alle soorten projecten, van initiatief tot oplevering en met uitvoering: strategische advisering, projectmanagement, het ontwerp, directievoering, toezicht en beheersadvies.
(Gemeente amsterdam, sd)

Civiele constructies
Het ingenieursbureau Gemeente Amsterdam heeft de expertise in huis om civiele constructies, inclusief funderingen, te ontwerpen en de bouw te begeleiden. Zij houden zich voornamelijk bezig met vaste- en beweegbare bruggen, waterbouwkundige constructies, infrastructurele constructies en maaiveldinrichtingen.

Bij vaste- en beweegbare bruggen adviseert het ingenieursbureau over het type constructie , materiaalgebruik, ontwerpt constructies en voert directie en toezicht op de bouwplaats. De aanwezigheid van scheepvaart, de grootte en de hoogte van schepen bepalen vaak de keuze voor een vaste of beweegbare brug.

Bij waterbouwkundige constructies kan gedacht worden aan constructies die min of meer in het water zijn gebouwd (sluizen, kademuren, duikers, steigers etc.). Constructies die Nederland beschermen tegen oprukkende water en die waterwegen in goede banen leiden.

Bij infrastructurele constructies houdt het ingenieursbureau zich voornamelijk bezig met (metro)tunnels, parkeergarages, metro-en busstations en maaiveldinrichting.
(Kooistra, sd)

2.2 Probleemstelling

Dichtbij Amsterdam Amstel is er een beweegbare basculebrug, de Berlagebrug, een verbinding voor al het verkeer tussen de Rivierenbuurt en Weesperzijde. Hierop zitten ook tramsporen verwerkt en gaan open wanneer grotere boten er langs moeten. De Berlagebrug is in 1931-1932 ontworpen door de architect H.P. Berlage. Deze brug is uitgeroepen tot rijksmonument en voldoet momenteel niet meer aan de huidige verkeersbelastingen door de vernieuwde eurocode. Deze eisen zijn wettelijk dus moet de brug gerenoveerd of vervangen worden om aan deze nieuwe eisen te voldoen. Anders mag de brug niet meer gebruikt worden of wordt het afgesloten voor zwaar verkeer. Dit is natuurlijk niet gunstig voor de doorstroming tussen de Rivierenbuurt en Weesperzijde. Renovatie van het val en bewegingswerk is uit kostenoverweging niet aantrekkelijk. Daarom is het gunstigst deze in zijn geheel te vervangen. Echter is het niet duidelijk of de nieuwe moderne aandrijvingen ook in de huidige basculekelder past. Dit is voor de renovatie erg belangrijk. Wanneer het niet in de huidige kelder kan, zou de gehele brug met onderbouw vervangen moeten worden. Dit veroorzaakt een ongunstige lange bouwtijd en extra kosten. Daarom moet er gekeken worden hoe de vernieuwde moderne aandrijvingen in de huidige kelder geplaatst kunnen worden en wat de mogelijkheden dan zijn.

2.2.1 Doelstelling

Het doel is om 30 juni 2017 een conceptueel ontwerp te leveren van moderne aandrijvingen van de Berlagebrug die in de huidige basculekelder geplaatst kunnen worden. Met daarbij een onderzoek naar de brug en kelder zodat het ingenieursbureau van Amsterdam inzicht krijgt naar de mogelijkheden.

2.2.2 Onderzoeks- en deelvragen

Naar aanleiding van de opdracht en probleemstelling luidt de onderzoeksvraag als volgt: 'Hoe kunnen de moderne aandrijving en de vernieuwde brug, die voldoen aan de huidige eisen, aangesloten worden op de bestaande basculekelder van de Berlagebrug?'

Deelvragen die hieruit komen om de onderzoeksvraag te kunnen beantwoorden:

1. Hoe ziet de Berlagebrug er uit?
    - 1.1. Hoe werkt de Berlagebrug?
    - 1.2. Hoe ziet de kelder er uit?
    - 1.3. Hoe ziet het krachtenspel eruit tussen onderbouw en bovenbouw?
2. Aan welke eisen moet de Berlagebrug voldoen?
    - 2.1. Wat zijn de verschillen tussen de oude normen en eisen t.o.v. de vernieuwde normen en eisen? (als verwachting dat de nieuwe normen gaan gelden voor de Berlagebrug).
3. Welke aandrijvingen worden gebruikt bij (vernieuwde) beweegbare basculebruggen?
    - 3.1. Welke mogelijkheden van aandrijvingen zijn er, om de brug te kunnen openen?
4. Hoe worden de vernieuwde aandrijvingen in de kelder geplaatst?

2.3 Scope

Amsterdam heeft vele oude bruggen, vaste en beweegbare bruggen. Beweegbare bruggen moeten na een bepaalde tijd onderhouden of gerenoveerd worden. Voor dit project wordt de focus gelegd op de Berlagebrug. Het project wordt hieronder verder afgebakend.

Locatie

In Amsterdam heb je zo'n 1680 bruggen. De Berlagebrug is brugnummer 423 en gaat van de Amsteldijk naar de Weesperzijde, zie figuur 2.1.



Figuur 2.1: locatie van de Berlagebrug

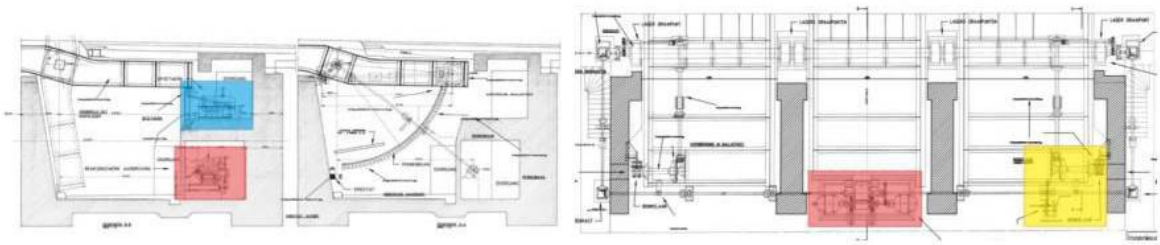
Basculekelder van de Berlagebrug

De Berlagebrug is zoals al gezegd een basculebrug. Een basculebrug is een beweegbare brug dat een rotatie om de horizontale y-as maakt als bewegingsrichting. Dat betekent dat dwars op het rijvlak een rotatie wordt gemaakt. Voor dit project wordt er alleen maar naar de kelder en het val van de brug gekeken. Bij deze basculebrug liggen de aandrijvingen en contragewichten namelijk verborgen in een kelder, ook wel een basculekelder, deze zorgen ervoor dat het val kan bewegen.

De kelder van de Berlage brug is 1020 x 2589 x 700cm waarvan 350cm onder NAP [1]

In de kelder, zie figuur 2.2, zitten de volgende belangrijke (hoofd) aandrijvingen:

- Opzetwerk
- Centraal lierwerk, ook wel bewegingswerk
- Handbeweging



Figuur 2.2: basculekelder met aandrijvingen

Deze aandrijvingen zijn verbonden met een aantal assen en overbrengingen. Deze hoofdaandrijvingen moeten voornamelijk onderzocht worden omdat ze ook in de moderne aandrijvingen moeten voorkomen. Het project zal zich daarom ook hoofdzakelijk richten op de basculekelder van de brug.

[1] NAP = Normaal Amsterdams Peil. X cm NAP betekend X: zoveel meter van het zeeniveau.

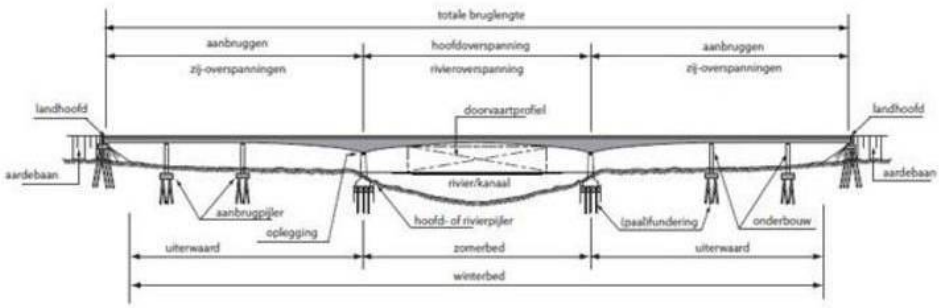
3 Resultaten

3.1 Analyse

Bij de analyse wordt de focus gelegd op de deelvragen. Hierin zullen de deelvragen beantwoord worden om tot een uiteindelijk conceptueel ontwerp te komen.

3.1.1 Vaste- en beweegbare bruggen

Elke brug, vaste- en beweegbare bruggen, bestaat uit twee hoofdonderdelen: de bovenbouw en de onderbouw, met daartussen opleggingen.



Figuur 3.1: schematische weergave van een brug

In de bovenbouw bevindt de constructie van de brug. De onderbouw rust met behulp van opleggingen op de onderbouw. De bovenbouw kan vast of beweegbaar zijn.
Te zien in figuur 3.1 is de bovenbouw grijs gekleurd. De uiteinden worden het landhoofd genoemd, deze verbinden de brug met het land. De tussengelegen stukken zijn de aanbruggen die worden ondersteund door brugpijlers.
(Nederlandse bruggenstichting, sd)

Beweegbare bruggen

Voor beweegbare bruggen zijn er verschillende bewegingsrichtingen mogelijk. Iedere beweging van een voorwerp, dus ook het openen en sluiten van een brug, is opgebouwd uit maximaal zes bewegingsrichtingen in de x-, y- en z-richting: drie verplaatsingen, ook wel translaties, en drie rotaties.

De voorkeur bij bruggen is een brugtype met één bewegingsrichting, één translatie of één rotatie. Iedere combinatie maakt beweging ingewikkelder en gevoeliger voor storingen. De verschillende brugtypes zijn eenvoudig in te delen op grond van de bewegingsmogelijkheid. Van de types beweegbare bruggen worden nog slechts enkele regelmatig gebouwd: de ophaalbrug, de basculebrug, de draaibrug, de hefbrug en de pontbrug.

De basculebrug

Een basculebrug heeft als bewegingsrichting een rotatie on de horizontale y-as, dwars op het brugdek. Het contragewicht wordt meestal verborgen in een kelder en zorgt voor de balans van het val[2]. Een basculebrug heeft als maximale doorvaartwijdte 60 meter. Het val is meestal het enige zichtbare, andere componenten zitten verwerkt in een kelder. Een basculebrug kan zowel enkel als dubbel[3] uitgevoerd worden. Zie meer informatie over bruggen in bijlage 1.
([redacted])

3.1.2 De Berlagebrug

De Berlagebrug, brug 423, is ontworpen in 1931-1932 door architect H.P. Berlage in opdracht van de gemeente Amsterdam. De brug dient als een verbinding voor al het verkeer tussen de Rivierenbuurt en Weesperzijde, zie figuur 3.2. De brug is in zakelijk expressionistische stijl ontworpen. Het is een vlakke, stalen brug met kadewerken, botenloodsen en bedieningstoren. De Berlagebrug is een basculebrug die ruim 100 meter lang en 24 meter breed is. Bevat vijf doorvaarten voor kleine boten met een vlak rijdek en asymmetrisch een geplaatste bedieningstoren. Aan de kades zijn botenhuizen aangelegd die met het hekwerk van de brug en lantaarnpalen een integraal deel vormen van het ontwerp. De bedieningstoren staat op een verbrede pijler (steunpilaar) met terras.



Figuur 3.2: de Berlagebrug

Belangrijk is dat de Berlagebrug en de bijhorende onderdelen van algemeen belang zijn vanwege:

- cultuur- en architectonische waarde;
- de samenwerking tussen architect en ingenieur;
- de kwaliteit van het ontwerp, de toegepaste materialen en kleuren.

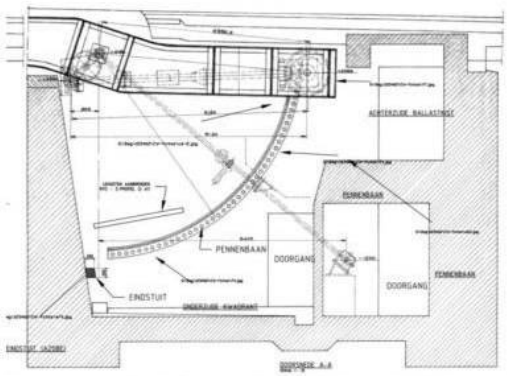
De Berlagebrug is dan ook een rijksmonument en mag daarom niet zomaar aangepast worden. (Rijksmonumenten, 2014)

[2] Het val is het beweegbare gedeelte van de brug.
[3] Wanneer een basculebrug dubbel is uitgevoerd, bevinden aan de beide landhoofden een basculebrug.

Werking

De Berlagebrug is een basculebrug. Bij een basculebrug is het val verlengd met een 'staart' waar aan het einde een ballastkist met ballast is aangebracht (contragewicht). Deze staart draait in een basculekelder die onder de rijweg ligt. Dit wordt gedaan met een rondsel dat langs een half cirkelvormige pennenbaan loopt.

In de doorsnede van basculekelder, figuur 3.3, is te zien hoe de brug open en dicht gaat. Hier is de staart te zien van het val. Een rondsel gaat langs een pennenbaan met aan de achterzijde van de staart is het ballastgewicht.



Figuur 3.3: verticale doorsnede van de basculekelder van de Berlagebrug

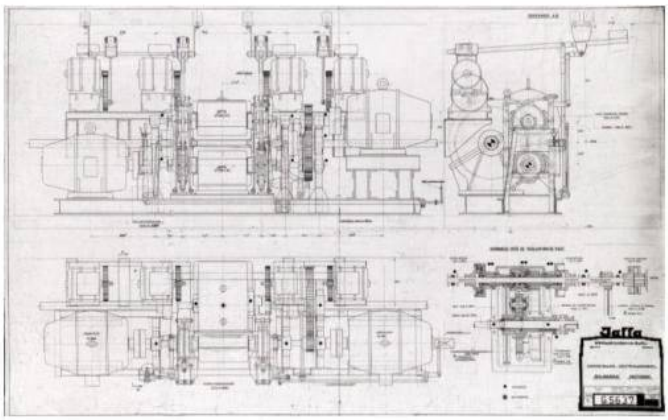
Huidige aandrijvingen

In de kelder zitten de volgende belangrijke (hoofd) aandrijvingen:

- Opzetwerk;
- Centraal lierwerk, ook wel bewegingswerk;
- Handbeweging.

Het opzetwerk bestaat uit twee assen met aan de uiteinden trek-duwstangen. Het opzetwerk ondersteunt de ballastkist wanneer het in dichte toestand is en zorgt ervoor dat het val dicht blijft en niet door het verkeer op en neer gaat. Wanneer de brug opengaat zal eerst het opzetwerk wegdraaien. Het opzetwerk wordt apart aangedreven door een motor.

Het centraal lierwerk, zie figuur 3.4, bestaat uit twee motoren die via tandwielkasten assen aandrijven. Eén motor wordt gebruikt voor hoge snelheden en de andere motor wordt gebruikt om het val met een langzame beweging op de opleggingen te plaatsen. De assen die uit de tandwielkasten komen, gaan via een hoekkast naar de bovenste verdieping en uiteindelijk via een andere hoekkast door de ballastkist naar het rondsel dat langs de pennenbaan gaat. Dit wordt symmetrisch aan beide kanten gedaan. Verder bestaat het centraal lierwerk ook uit een remmechanisme.



Figuur 3.4: centraal lierwerk van de Berlagebrug

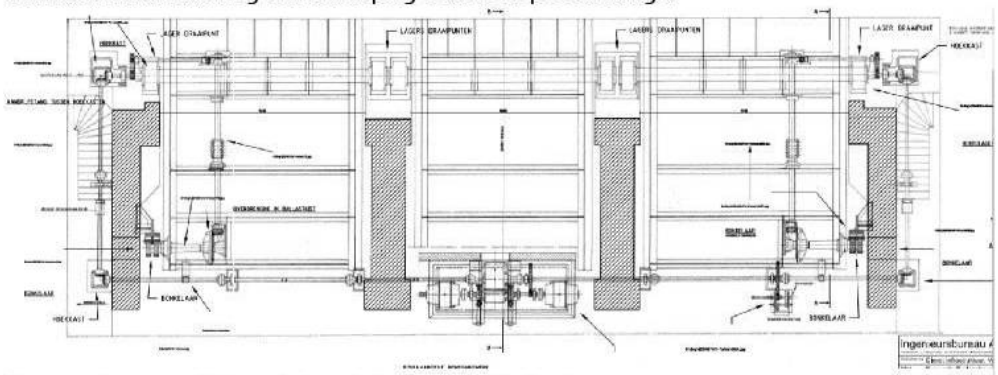
Omdat het centraal lierwerk uit zoveel onderdelen bestaat, kost het veel onderhoud. Dit is een nadeel wat te zien is bij meerdere oude bruggen.

Als handbeweging zijn er drie tandwielen die met elkaar verbonden zijn. Eerste tandwiel is een klein tandwiel, ook wel rondsel, die met de hand te draaien is. Deze stuurt het tweede tandwiel aan die over gaat naar een derde groter tandwiel. Het derde tandwiel stuurt uiteindelijk de assen aan die naar de pennenbaan gaan. Zo kan de brug zonder stroom met de hand worden bestuurd. Dit wordt enkel in noodsituaties gebruikt.

Basculekelder

Zoals al aangegeven is de kelder van de Berlagebrug 1020 x 2589 x 700cm waarvan 350cm onder NAP. De kelder heeft twee verdiepingen en is ingedeeld in drie verschillende ruimtes, zie figuur 3.5.

Beneden in de kelder, in het midden, bevindt zich het centraal lierwerk met rechts de handaandrijving. Deze loopt door naar boven waar de pennenbaan begint. Boven het centraal lierwerk bevindt zich nog een verdieping waar het opzetwerk ligt.



Figuur 3.5: bovenaanzicht van de basculekelder van de Berlagebrug

Het val

Het val is 14x23 (Lxb) en heeft een verlenging, staart, van 5 m lang. Het val is van staal met een brugdek bestaande uit hoofdliggers, dwarsdragers, langsliggers en randliggers. De hoofdliggers en dwarsdragers zijn samengestelde (geklonken) I-profielen. Op de bestaande hoofdliggers en dwarsdragers liggen orthotroop stalen dekpanelen. Het brugdek is ingedeeld in drie rijbanen plus trambanen met aan de zijkanten van de rijweg verhoogde fietsstroken en voetpaden. Zie bijlage 2 voor een overzicht van de brugconstructie.

Langsliggers

De langsliggers zijn I-vormige walsprofielen (HEB240) en worden gebruikt ter ondersteuning van het dek en de tramrails. De randliggers liggen onder het voetpad en zijn U-vormige walsprofielen (UNP300).

Dwarsdragers

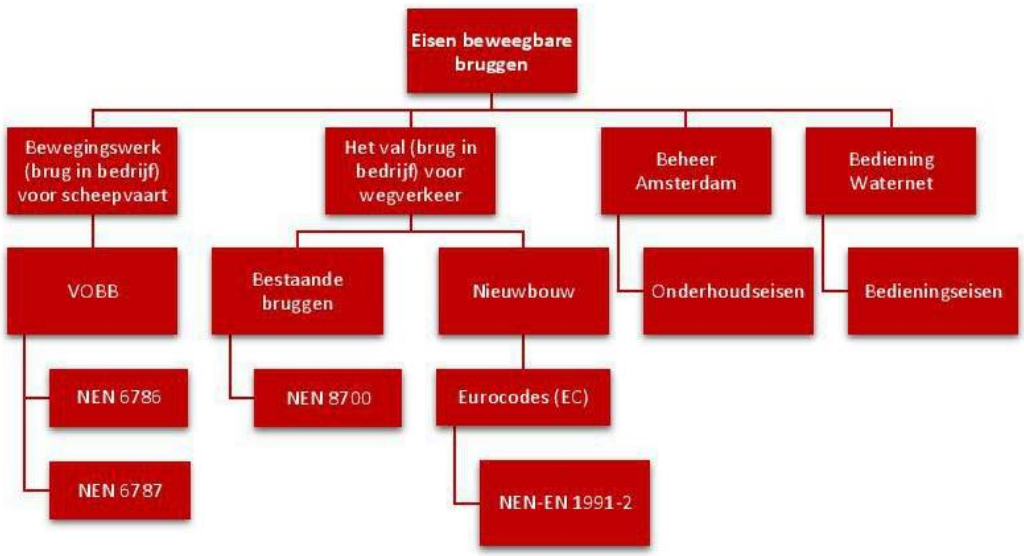
De dwarsdragers zijn I-vormige samengestelde geklonken profielen met verschillende doorsnedes. Voor de maatvoering zijn de afmetingen genomen die in bijlage 2 te zien zijn.

Hoofdliggers

De hoofdliggers zijn ook I-profielen. Deze verschillen in verschillende doorsnedes en hebben een verlopende hoogte. Zie bijlage 2 voor de afmetingen van de onderdelen.
(Sauveplanne, 2015)

3.1.3 Eisen voor beweegbare bruggen

De Berlagebrug is een beweegbare brug. Voor beweegbare bruggen zijn er specifieke eisen waaraan het ontwerp moet voldoen. Voor bruggen zijn er verschillende nationale normen als euronormen. Deze eisen kunnen onderverdeeld worden als volgt:



Figuur 3.6: verdeling eisen beweegbare bruggen

Uit figuur 3.6 is af te leiden dat de Berlagebrug in aanmerking komt met de normen NEN 6786, 6787, 8700 en de bijhorende onderhouds- en bedieningseisen. Voor het bewegingswerk wordt er voornamelijk gekeken naar de VOBB.

De normen NEN 6786 (NL) en 6787 (NL) zijn sinds kort vernieuwd. Ze zijn namelijk aangepast om aan te sluiten op de eurocodes (EC). Dit betekent dat de oudere bruggen in Amsterdam niet meer voldoen aan bepaalde eisen. Dus moeten de huidige (oude) bruggen gecontroleerd worden op de huidige geldende normen. De vernieuwde normen zijn echter nog niet ingegaan maar er wordt vanuit gegaan dat de Berlagebrug wel aan deze eisen moet gaan voldoen. Er wordt daarom een onderzoek gedaan naar de eisen en wat dan de verschillen zijn tussen de oudere normen en de vernieuwde normen.
(NEN, 2016)

NEN 6786 (VOBB)

De nationale NL norm 6786 zijn voorschriften voor het ontwerpen van beweegbare bruggen (VOBB). Deze norm geeft technische bepalingen voor het toetsen van de constructieve veiligheid van de mechanische uitrusting van alle typen beweegbare bruggen voor weg- en railverkeer en fietsers en voetgangers. VOBB moet in samenhang worden gebruikt met NEN 6787. (NEN, 2001)

Bij het vergelijken van de nu huidige norm NEN 6786 (2001) met de vernieuwde norm (2016), zie bijlage 4, zijn er verschillen opgemerkt. Het belangrijkste verschil ligt bij de berekeningen voor de windbelasting en het brugbewegingsmechanisme. Hier zijn enige factoren aangepast. Deze factoren zijn aangepast om de NEN 6786 aan te laten sluiten op de eurocodes. Hierdoor voldoet het brugbewegingsmechanisme van de Berlagebrug dus niet. Deze moet weer berekent worden en moet waarschijnlijk worden vervangen, aangezien het een vrij oude brug is (sinds 1932, 85 jaar oud).
(NEN, 2016)

NEN 6787

Deze NEN is opgesteld voor veiligheidsvoorschriften voor beweegbare bruggen en komt voort uit de machinerichtlijnen. Deze norm is ook een nationale NL norm en bevat eisen en aanbevelingen voor een veilig ontwerp van beweegbare bruggen. (NEN, 2003)

Zie bijlage 3 voor enkele belangrijke eisen van de VOBB.

3.1.4 Belastingen en krachten

De belastingen die werken op het val (volgens de VOBB 2016):

- **Eigengewicht;**

Massa van het val (constructieve elementen). Het eigengewicht van het val mag worden gebalanceerd. Met de evenwichtsberekening, zie bijlage 5, kan dan het eigengewicht en het gewicht van de ballastkist worden berekend.

- **Variabel dekgewicht;**

Variabel dekgewicht is het gewicht van afwijkingen van het theoretische overgewicht veroorzaakt door slijtage, regen etc. De meest ongunstigste waarde, positief of negatief, moet in rekening worden gebracht. Voor het oppervlak moet zijn gerekend met de verticale projectie.

De representatieve waarde van het variabel dekgewicht bedraagt voor:

- elektro-mechanisch en hydraulisch bewogen bruggen met een stalen dek:
  $p_{v;eg}$ = + of -50 N/m$_2$
- met de hand bewogen bruggen met een stalen of een houten dek:
  $p_{v;eg}$ = + of -100 N/m$_2$.

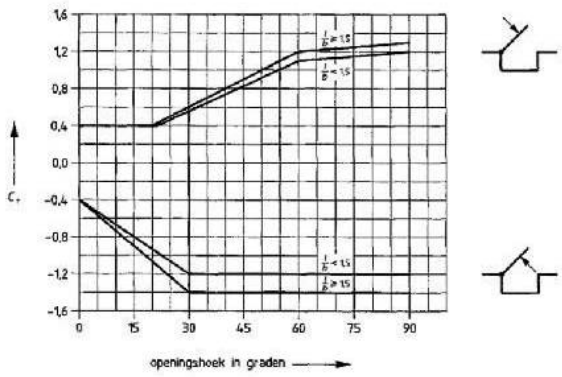
- **Windbelasting;**

<u>Tijdens bewegingscyclus van het val</u>

De formule die moet worden gebruikt om de windbelasting te bepalen:

$$Mw;brug = 1{,}05 * cs * cd * Ct * \Sigma\, Qp * Smom$$

S_{mom} is het statisch moment (m$_3$) van het door de wind getroffen oppervlak van het val ten opzichte van de draaiingsas van de brug;
c_s is de afmetingsfactor; c_s = 0,95;
c_d is de dynamische factor; c_d = 1,15;
C_t is de windvormfactor gegeven in figuur 3.7;
Qp is de stuwdruk.



Figuur 3.7: windvormfactor

- **Stuwdruk;**

De formule die moet worden gebruikt om de stuwkracht uit te rekenen:

$$Qp = 1{,}2 * \rho * (vm \frac{\ln\left(\frac{Ze}{Zo}\right)}{\ln\left(\frac{Zvw}{Zo}\right)})^2 * (1 + (\frac{7}{\ln\left(\frac{Ze}{Zo}\right)})$$

ρ is de luchtdichtheid van 1.25 kg/m^3;
vm is de 10 minuten gemiddelde windsnelheid op 10 meter hoogte boven maaiveld gemeten;
Ze referentiehoogte van het val t.o.v. de waterstand (NAP);
Zo is de ruwheidslengte bepaald in VOBB 2016; Zo= 0.2m;
Zvw is de hoogte boven het maaiveld waarop de 10 minuten gemiddelde windsnelheid (vm) is bepaald, Zvw=10m.

Hierbij moet, voor tijdens de bewegingscyclus ,te verwachten windsnelheid uitgegaan zijn van de gemeten 10-min gemiddelde windsnelheid v10, gemeten met een geijkte windmeter. Hiervoor moet er eerst bepaald worden welke type zeevaart de Amstel, waar de Berlagebrug overbrugt, onder wordt verstaan. In Amsterdam vallen de meeste grachten bij 'overige vaarwegen (type4)'. Daarnaast zijn er een paar hoofdvaarwegen waaronder de Amstel-route valt. Deze worden volgens tabel 1 van de VOBB 2016 als type 3 beschouwd. Verder heeft de Berlagebrug een doorvaarthoogte van 11,90m. De brug heeft hierdoor 48 uren maximaal per jaar niet bedienbare uren vanwege een te hoge windbelasting. (CIV, 2017)

- **Wrijvingsfactoren**

De belasting veroorzaakt door de weerstand ten gevolge van wrijving op de lagers moet zijn bepaald met de wrijvingsfactor μ_r . Deze factor heeft betrekking op roterende bewegingen en translerende bewegingen. De wrijvingsfactor voor staal/staal (gesmeerde lagers) is, μ_r= 0.25.

- **Belasting op mechanische uitrusting**

De rekenwaarde van de belastingen op de mechanische uitrusting moeten zijn bepaald met de belastingssituaties, zie tabel 11 t/m 20 van VOBB 2016. Alle stijfheden, massatraagheden en belastingen moeten naar de motoras zijn herleid. Hier moet ook rekening gehouden worden met rendementsfactoren en energieverliezen in het bewegingswerk. Bij toepassing van twee brugbewegingsmechanisme (elektro-mechanische aandrijving) die wordt aangedreven door elk een eigen motor, moet voor de belasting elk bewegingsmechanisme worden getoetst op een belasting die gelijk is aan 2/3 van de gezamenlijke belasting. Dit in verband met aanwezigheid van spelingen.
(NEN, 2016)

Ontwerpvoorwaarden

Voor de (elektro)mechanische uitrusting zijn de volgende ontwerpvoorwaarden berekend. De aandrijvingen moeten hier aan voldoen. Hier is voornamelijk tabel 11 van de VOBB 2016 gebruikt, zie bijlage 8.

Gewicht/massatraagheid

Om het eigengewicht te bepalen is er een analyse gedaan op de stalenonderdelen waaruit het val bestaat. Deze onderdelen zijn vervolgens in het evenwichtsberekening meegenomen. De

soortelijke massa van staal is 7850 kg/m^3. Deze wordt vermenigvuldigd met de afmetingen van de onderdelen om de massa te bepalen. Van elk onderdeel is er vervolgens de massatraagheidsmoment bepaald, zie bijlage 5.

Het eigengewicht[4] is rond 130 ton. Dit betekent dat het ballastgewicht 158 ton moet zijn om de brug in balans te houden. Het balanceren van de brug is erg belangrijk om de krachten op het bewegingswerk zo veel mogelijk te beperken.

Bij de belasting moet er een extra gewicht meegenomen worden, het variabel dekgewicht. Dit gewicht wordt niet meegenomen in het evenwichtsberekening maar wordt opgevangen door de aandrijvingen. Volgens de VOBB 2016 heeft het variabele dekgewicht een waarde van p_{veg} = + of - 50 N/m^2. Met de verticale projectieoppervlakte geeft dit een kracht van: $F_{veg} = \rho_{veg} * A_{vert} = 50 * (22 * 0.75) \approx 863\ N$.
(NEN, 2016)

Belastingen op de brug
De windbelasting is berekend met de formule van hoofdstuk 3.1.4. Hier is te zien dat de windbelasting afhangt van de stand van de brug. De windbelasting is berekend tot een openingshoek van 85 graden. Meer dan 85 graden draait de brug niet. Bij deze openingshoek geeft de windbelasting een moment van 1682 kN.

Voor de stuwdruk is er vanuit gegaan van de basiswaarden (volgens NEN-EN 1991-1-4) waarin is bepaald dat de Berlagebrug in windgebied II en terreincategorie II bevindt. Verder heeft het volgens de VOBB 2016 maximaal 48uren per jaar niet bedienbare uren. Dit geeft vervolgens een windsnelheid van 13,5 m/s, zie tabel 3 van het VOBB 2016. De referentiehoogte van het val t.o.v. de waterstand zit op 18.19m. Dit geeft een stuwdruk van 0,826 kN/m^2. Deze waarde ligt onder de waarde van extreme stuwdruk, gegeven in de NEN-EN 1991-1-4, van 0,98 kN/m^2. Zie bijlage 6 voor de volledige berekeningen.

Krachten (weerstandskrachten)
Op het val werken er verschillende verticale krachten die effect hebben op het draaipunt. Er is sprake van een opzetkracht vanuit de veerbuffer (Fopzet), onbalans (Fonbalans), een kracht door het eigengewicht (Fval) en een kracht door het gewicht van de ballastkist (Fball). Deze krachten worden ook meegenomen in de berekening voor het bepalen van de onderdelen. Alle krachten worden dan herleid naar de motoras. Zie hoofdstuk 3.3.2. Doordat de brug grotendeels in balans is gebracht vallen Fval en Fball af en is er nog alleen de kracht Fonbelans van 20kN over. Dit geeft een moment van 278 kNm. De lagers/assen bij het draaipunt moeten dus minimaal deze kracht aankunnen. Verder is er ook een wrijvingskracht (op de lagers). De wrijvingsfactor van staal/staal is volgens VOBB 2016 μ_r=0,25. Wanneer deze wordt vermenigvuldigd met Fval+Fball komt de wrijvingskracht Fr=644 kN.

Zie bijlage 6 voor de volledige berekeningen.

[4] Het eigengewicht dat is bepaald is een schatting. Niet alle (stalen)onderdelen zijn meegenomen zoals de leuningen en verbindingsmaterialen (bouten, moeren etc.).

3.1.5 Aandrijvingen

Beweegbare bruggen kunnen op verschillende manieren worden aangestuurd: mechanisch, elektromechanisch, met de hand of hydraulisch.

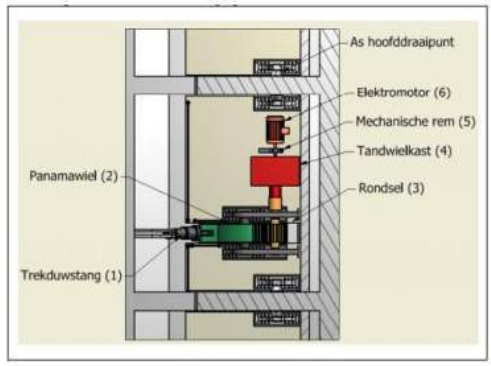
Als er wordt gekeken naar elektromechanische beweegbare basculebruggen zijn bij oudere bruggen meestal dat er heugelbanen worden gebruikt of pennenbanen. Voor zulke bruggen werden vroeger elektrische weerstanden gebruikt voor de snelheidsregeling. Deze zijn noodzakelijk om de brugsnelheid te kunnen beperken en voorkomen dat de brug niet met een harde klap sluit. Bij basculebruggen en ophaalbruggen zijn er ook mechanische regelmechanisme ontworpen.

Een aantal voorbeelden van mechanische regelmechanisme voor basculebruggen:

- Panamawiel
- Slakkenhuis
- Schelp

Panamawiel

Een panamawiel is een groot tandwiel dat door een rondsel (kleiner tandwiel) wordt aangedreven. De aandrijving bestaat uit een elektromotor met tandwielkast(en) wat via een rondsel het panamawiel aandrijft. Aan het panamawiel zit meestal een kruk-drijfstangmechanisme. Een panamawiel verzorgt een mooi geleidelijke aanloop en afremming van een brugbeweging. Voor het openen en sluiten van een brug worden er geen volledige omwentelingen gemaakt, daarom zijn de meeste panamawielen niet volledig rond. Verder zorgt het krukdrijfstangmechanisme ook voor een enkele vertraging.
(Jansen Venneboer)



Figuur 3.8: aandrijving van de Koningin Julianabrug

Een voorbeeld van een bewegingswerk met panamawiel is het bewegingswerk van de Koningin Julianabrug, figuur 3.8. Hier is te zien dat het panamawiel wordt aangedreven door een elektromotor. Het panamawiel wordt tegenwoordig vaak gebruikt bij (vernieuwde) basculebruggen. Omdat het robuust is maar ook eenvoudig.

Slakkenhuis

Bij een slakkenhuis is de werking gebaseerd op de verandering van de kromtestraal binnen het slakkenhuis. Als bij het sluiten van de brug het rondsel aan het einde van de heugel bereikt, wordt

de opzetrol gevangen door het roterende slakkenhuis. Gaat de baan binnen het slakenhuis over in een cirkel dan is er geen beweging meer mogelijk.

Schelp

Een schelp is een soort verlenging van een heugelbaan die afloopt in een boog. Dit zorgt ervoor dat bij het sluiten het val geleidelijk terug wordt gebracht naar nul.

Kromme heugel

Verder kan een kromme heugel ook de sluitsnelheid vertragen, zonder de toerental van de elektromotor hoeven te verminderen. Deze heeft ongeveer dezelfde principe als de schelp. Een kromme heugel loopt aan het einde af in vorm van een boog.

Echter door ontwikkelingen in de elektronica maakt het mogelijk ook de snelheid van een draaistroommotor te regelen. Een frequentieregelaar kan nu tijdens de bewegingscyclus de motor versnellen, vertragen etc. mechanische regelmechanisme zoals een slakkenhuis en schelp zijn hierdoor niet nodig.
(Civiele kunstwerken, 1997)

Remmen

Een ander belangrijk aspect is de rem. De rem kan zowel elektrisch, de motor levert een tegenwerkend koppel, of mechanisch en/of hydraulisch. De rem kan verschillende functies hebben:

- de stoprem moet het bewegingswerk stopzetten en vernietigd de kinetische energie.
- de vasthoudrem moet onder alle omstandigheden de brug vasthouden als die tot stilstand is gekomen.

Er zijn verschillende soorten remtypen. Voor kleine, met de hand bewogen bruggen wordt de bandrem vaak toegepast. Schijfremmen hebben het voordeel dat ze kleine inbouwmaten hebben maar worden voornamelijk gebruikt bij kleinere bruggen. Het nadeel bij deze rem is dat het grote drukkrachten nodig heeft om een bepaalde vertraging te kunnen behalen.
De klossenrem is de meest toegepaste remtype. Deze zit om de motoras heen en is (standaard) bekrachtigd wanneer de motor uitgeschakeld is. Wanneer de motor in werking komt gaat de remhefboom van de klossenrem omhoog waardoor de remklossen los komen. Tegenwoordig worden, voor meer veiligheid, remmen vaak toegepast met hydraulische remlichters.

3.1.6 Programma van Eisen

Onderwerp	Eisen	
1. Algemene beleid, specifieke randvoorwaarden en uitgangspunten	1.1.	De mechanische uitrusting van een beweegbare brug is berekend aan de hand van NEN 6786 (2016).
	1.2.	Er wordt vanuit gegaan dat de vernieuwde eisen betrekking gaan hebben op de Berlagebrug.
	1.3.	Er wordt vanuit gegaan dat de huidige kelder behouden moet worden.
	1.4.	De mechanische uitrusting moet getoetst worden op veiligheid volgens NEN 6787.
	1.5.	Het brugbewegingsmechanisme moet voldoen aan de machinerichtlijnen.
	1.6.	De Berlagebrug is een rijksmonument, hierbij moet er rekening gehouden worden met monumentenzorg.
2. Ontwerp	2.1.	Het brugbewegingsmechanisme moet in de huidige kelder geplaatst kunnen worden.
	2.2.	Het brugbewegingsmechanisme moet het val kunnen dragen, openen en sluiten.
	2.3.	Het brugbewegingsmechanisme moet het val op elke stand (hoek) kunnen vasthouden.
	2.4.	Het brugbewegingsmechanisme moet een levensduur hebben van 50 jaar.
	2.5.	Het brugbewegingsmechanisme moet het val geheel kunnen openen of sluiten binnen 60s.
	2.6.	Het brugbewegingsmechanisme moet worden voorzien van de volgende remvoorzieningen: voor het reguliere brugbewegingsproces (vertragen), voor het vasthouden in een bepaalde stand en een noodremvoorziening die de brug in veilige toestand brengt bij gevaarlijke situaties.
	2.7.	Het brugbewegingsmechanisme moet op zijn uiterste toestanden zijn berekend.
	2.8.	Het val moet niet onverwachts in beweging komen door bijvoorbeeld verkeersbelastingen.
3. Gebruik, bereikbaarheid en veiligheid	3.1.	Het ontwerp van de beweegbare brug moet zo zijn ontworpen dat het plegen van onderhoud en inspecties veilig kan worden uitgevoerd.
	3.2.	De elektrische aangedreven mechanismen moet bij storing met de hand of andere voorzieningen kunnen worden bewogen.
	3.3.	Remvoorzieningen moeten zo zijn ontworpen dat bij stroomuitval de remvoorzieningen automatisch in remmende toestand worden gebracht.
	3.4.	Aandrijfsystemen moeten zo ontworpen zijn dat de onderdelen die

	voor onderhoud regelmatig geïnspecteerd/vervangen moeten worden goed en veilig bereikbaar zijn. 3.5. Bij mechanische aandrijvingen moeten open tandwiel- , kabel- en kettingoverbrengingen voorzien zijn van een afscherming. 3.6. Bewegende onderdelen die vrij bewegen moeten worden aangegeven met een markering. 3.7. Het brugbewegingsmechanisme moet geen geluidoverlast veroorzaken.

Tabel 3.1: programma van eisen

Selectiecriteria

Om de concepten te toetsen is er eerst een selectiecriteria opgesteld. Deze worden meegenomen in de keuzematrix waar de concepten worden beoordeeld.

- Werking/efficiëntie;
  Het concept voldoet aan de eisen en kan het brugval openen zoals het hoort. Hierbij wordt er ook gekeken naar de snelheid en de sterkte die de aandrijvingen hebben.

- Betrouwbaarheid;
  Het concept is betrouwbaar, kans op storingen is zo klein mogelijk.

- Bereikbaarheid;
  Het concept moet goed bereikbaar zijn voor eventuele onderhoudsmaatregelen, inspecties en/of tijdens storingen.

- Onderhoudsvriendelijk;
  Het is gunstiger als er zo min mogelijk onderhoud gepleegd hoeft te worden.

- Kelder behoud;
  Het concept moet het liefst zo compact mogelijk en moet in de huidige kelder geplaatst kunnen worden met zo min mogelijke aanpassingen.

- Uitvoerbaarheid;
  Het is belangrijk dat een concept daadwerkelijk uitgevoerd kan worden waarin kosten en tijd belangrijk zijn.

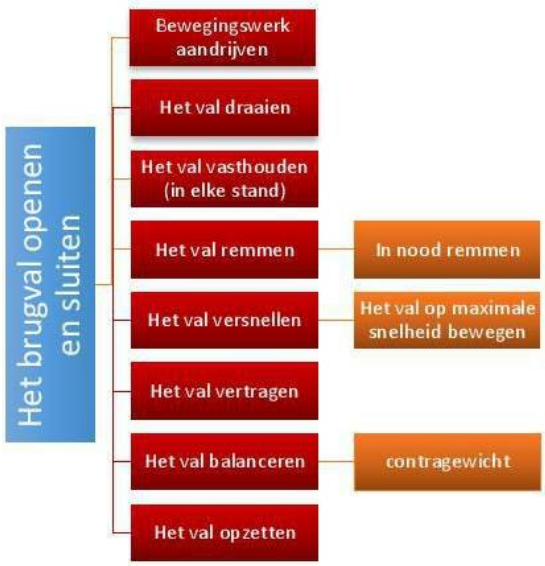
- Bouwtijd;
  Als een concept makkelijk en snel in de kelder geplaatst kan worden en de kosten niet hoog zijn., heeft dit concept de voorkeur.

- Monumentale zorg;
  Omdat het concept een rijksmonument is, wilt monumentenzorg een concept die het minst afwijkt met de huidige aandrijvingen waarin de brug en kelder behouden kan blijven.

3.2 Ontwerp

In deze hoofdstuk zal er met een aantal ontwerpmethodes gewerkt worden om tot een conceptueel ontwerp te komen. Vervolgens wordt er een uiteindelijk concept gekozen.

3.2.1 Functieanalyse



Figuur 3.9: functieanalyse van het aandrijvingswerk van de Berlagebrug

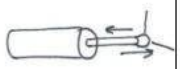
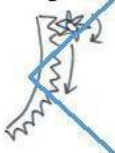
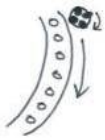
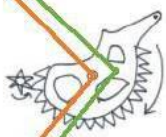
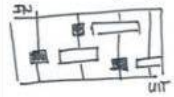
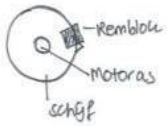
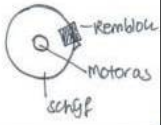
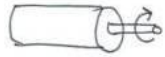
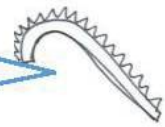
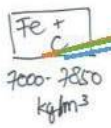
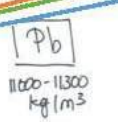
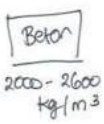
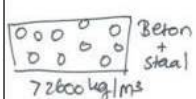
Figuur 3.9 laat een functieanalyse zien van het bewegingswerk. De hoofdfunctie van het bewegingswerk is het openen en sluiten van het brugval. De opgenoemde deelfuncties zijn functies die het bewegingswerk moet hebben. Deze functies worden daarom ook meegenomen in het morfologisch overzicht.

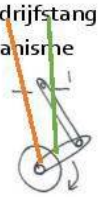
3.2.2 Morfologisch overzicht

Een morfologisch overzicht laat de verschillende opties zien per functie. De opties kunnen natuurlijk gecombineerd worden. Uit het morfologisch overzicht zijn er uiteindelijk drie concepten gekomen:

- Concept 1: Moderne versie van de bestaande aandrijvingen.
- Concept 2: Panamawiel met twee ballastkisten
- Concept 3: Panamawiel met drie ballastkisten

Zie figuur 3.10 voor de morfologische overzicht van het bewegingswerk.

Functies	Oplossingen				
Bewegingswerk aandrijven	Ongeregelde motor 	Geregelde motor 	Hydraulische cilinder 		
Het val draaien	Tand(heugel)baan 	Pennenbaan 	Planamawiel 	Hydraulische cilinder 	Tandwielkast (overbrengingen) 
Het val vasthouden (in elke stand)	Schijfrem 	Klossenrem 	Elektro-Hydraulische rem		
Het val remmen	Schijfrem 	Klossenrem 	Elektro-Hydraulische rem	Tegenwerkend motorkoppel 	
Het val versnellen	Geregelde motor 				
Het val vertragen	Geregelde motor 	Slakkenhuis 	Schelp 	Kruk-drijfstang mechanisme 	Kromme heugel 
Het val balanceren (contragewicht)	Staal 	Lood 	Beton 	Ponsdoppenbeton 	

Het val opzetten	Trek-/duwstang mechanisme 	Kruk-drijfstang mechanisme 	Onbalans 		

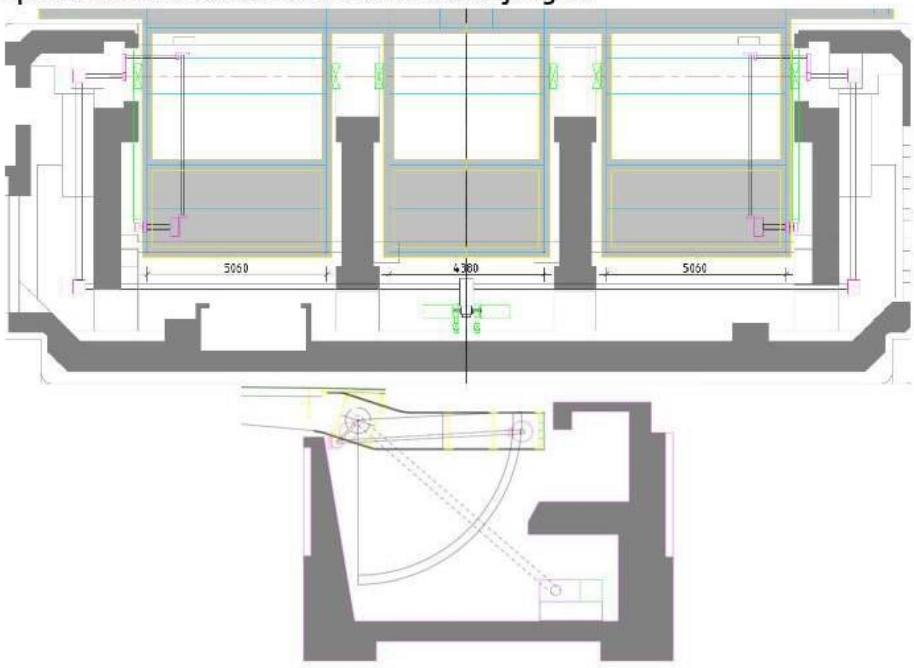
Figuur 3.10: morfologisch overzicht van het bewegingswerk Berlagebrug

Concept 1 is een vernieuwing van het bestaande bewegingsmechanisme. Dit concept past in de bestaande kelder en is dus verstandig om het ook in beschouwing te nemen. Voor concepten 2 en 3 wordt er gebruik gemaakt van dezelfde onderdelen. Echter worden ze anders opgesteld. Er is voornamelijk gekozen voor het panamawiel omdat het robuust is en minder inbouwruimte nodig heeft, weinig onderhoud hoeft en de brug opzet met behulp van de kruk-drijfstangmechanisme. Waardoor dus geen apart opzetwerk hoeft te komen.

3.2.3 Concepten

Er zijn drie concepten uit het morfologisch overzicht gemaakt. Deze concepten zijn uitgewerkt in CAD om te analyseren of het in de kelder past en of de concepten te realiseren zijn.

Concept 1: Moderne versie van de bestaande aandrijvingen.



Figuur 3.11: boven- en zijaanzicht concept 1

Bij concept 1, zie figuur 3.11, worden de huidige aandrijvingen geheel vervangen. De opstelling blijft echter hetzelfde. Het centraal lierwerk zal met geregelde motoren aangedreven worden. Deze gaat ook met behulp van assen via de hoofddraaipunten door de ballastkist en zal dan met een rondsel langs een kromme heugelbaan gaan. De onderdelen worden berekend met de nieuwe normen waardoor de levensduur weer omhoog gaat. Echter door de vele onderdelen kan het vervangen en opzetten van het bewegingswerk veel tijd in beslag nemen.

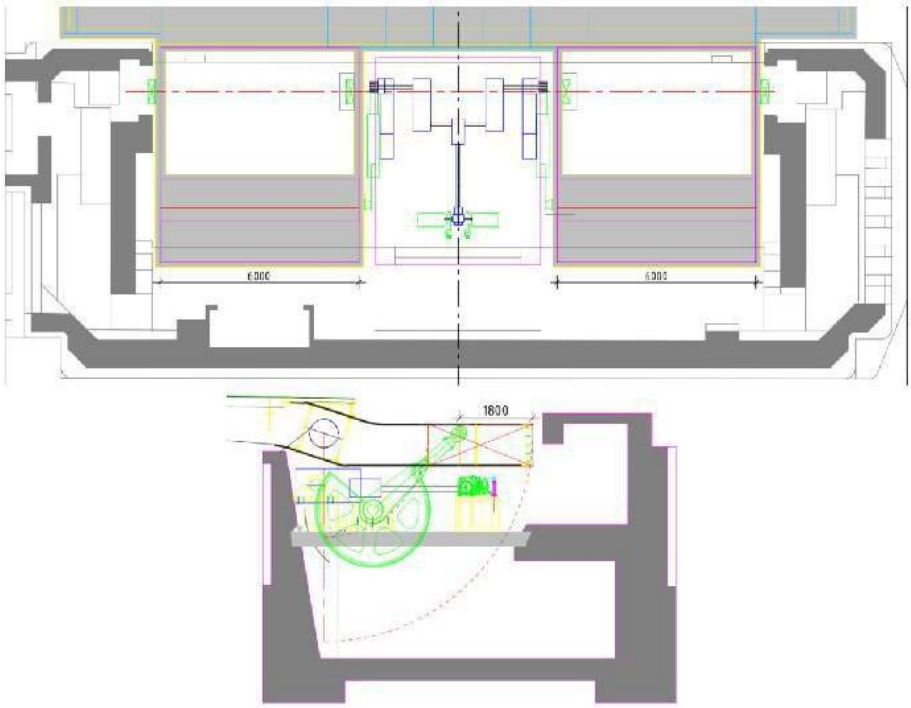
Voordelen

- Kelder kan behouden worden, geen aanpassingen in de kelder nodig waardoor bouwtijd enigszins wordt verkort.

Nadelen

- Kost veel onderhoud,
- Onderdelen moeten door de ballastkist, waardoor het lastig bereikbaar is,
- Een opzetwerk is benodigd,
- Het opzetten van het bewegingswerk vergt meer tijd (door vele onderdelen),
- Door de lange assen buitenom is de aandrijving torsieslap wat voordelig is voor de dynamische krachten.

Concept 2: Panamawiel met twee ballastkisten.



Figuur 3.12: boven- en zijaanzicht concept 2

Het tweede concept, zie figuur 3.12[5], maakt gebruik van twee panamawielen om de brug te openen en te sluiten. Deze zitten vast aan een betonnen bordes, gelegen in het midden van de kelder. Het betonnen bordes zorgt ervoor dat de aandrijvingen makkelijk en veilig te bereiken zijn. Dit kan alleen worden gedaan als het brugval bestaat uit twee ballastkisten. Uit de evenwichtsberekening blijkt dan dat de twee ballastkisten ongeveer één meter verbreed moeten worden waardoor de binnenste muren van de kelder weg moeten. Het betonnen bordes zal dan de bestaande muren vervangen. Voor extra versteviging kunnen er nog stalen/betonnen palen worden aangelegd.

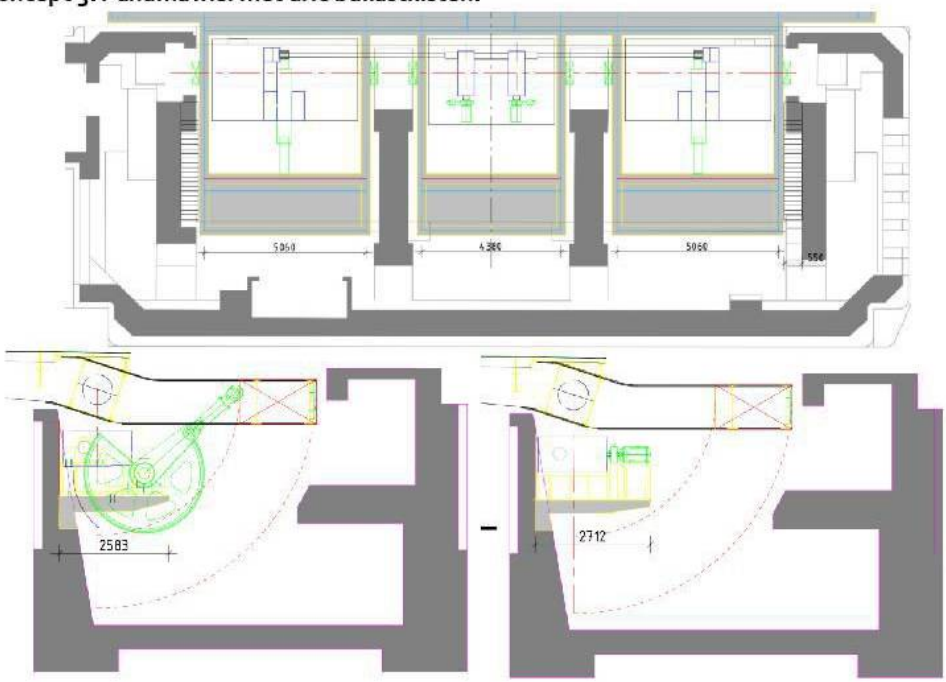
Voordelen

- Goede en veilige bereikbaarheid van de aandrijvingen,
- Robuust,
- Eenvoudig en neemt weinig ruimte in,
- Ballastkisten kunnen vrij draaien,
- Geen aparte opzetwerk benodigd.

Nadelen

- De kelder moet aangepast worden (binnenkant),
- De aandrijvingen zijn torsie stijver door de compacte bouw waardoor hogere dynamische aandrijfkrachten optreden.

Concept 3: Panamawiel met drie ballastkisten.



Figuur 3.13: boven- en zijaanzicht concept 3

[5] Onderdelen zijn overgenomen van de klaprozenweg brug om de verhoudingen kloppend in de tekeningen te kunnen plaatsen. Dit zijn niet de uiteindelijke onderdelen en afmetingen.

Concept drie, figuur 3.13, maakt ook gebruik van twee panamawielen. Alleen worden deze in het midden van de ballastkist geplaatst, links en rechts. Met dit concept kan de huidige kelder en brugval grotendeels behouden worden. Het bewegingswerk moet dan geplaatst worden op betonnen bordessen. In het midden bordes liggen de aandrijvingen, de assen gaan dan door de muren naar de panamawielen. Om dit te kunnen realiseren moeten de ballastkisten worden verkort in lengte. Hiervoor is er gekeken bij de evenwichtsberekening of dat mogelijk was. Hieruit is gebleken dat de ballastkisten kunnen worden verkort tot 1,8 meter lang. Verder kan men met behulp van trappen de dekken bereiken. Deze trappen moeten echter wel beveiligd zijn. De brug kan namelijk niet draaien wanneer de trappen nog geplaatst zijn tegen de betonnen bordessen. Toegankelijkheid wordt hierdoor lastiger. Elk betonnen bordes heeft een andere toegang.

Voordelen

- Robuust,
- Eenvoudig en vergt minder bouwruimte,
- Geen aparte opzetwerk benodigd,
- Kelder kan grotendeels behouden worden,
- De aandrijving is minder torsie stijf wat lagere dynamische aandrijfkrachten.

Nadelen

- Betonnen dekken minder makkelijk toegankelijk,
- Betonnen dekken moeten worden aangebracht, levert extra bouwtijd.

3.2.4 Keuzematrix

		Beoordeling		
Selectiecriteria	Weging	Concept 1	Concept 2	Concept 3
Werking/efficiëntie	5	30	40	45
Betrouwbaarheid	4	24	32	36
Bereikbaarheid	4	24	40	28
Onderhoudsvriendelijk	3	9	27	27
Kelder behoud	4	36	16	28
Uitvoerbaarheid	3	18	21	27
Bouwtijd	5	35	20	40
Monumentale zorg	2	20	10	14
	Totaal:	**196**	**206**	**245**

Tabel 3.2: totale keuzematrix

Bovenstaande tabel laat de totale keuzematrix zien. Elk selectiecriteria heeft een weging gekregen van 1 tot en met 5. Met 1 als niet belangrijk en 5 als het belangrijkst. Werking en bouwtijd hebben de hoogste weging gekregen. Elk concept moet natuurlijk goed werken en hoe efficiënter, hoe beter. Verder is de bouwtijd ook erg belangrijk omdat hier de meeste kosten aan verbonden zijn. De bouwtijd is daarom als even belangrijk gezet als de werking. De selectiecriteria

die van belang zijn bij het probleem hebben een weging van vier gekregen. Dat zijn betrouwbaarheid, bereikbaarheid en kelder behoud. In de bruggenbouw moet het concept betrouwbaar zijn daarom zijn de concepten hierop met een hoge weging gewogen. Verder is het van belang dat de aandrijvingen goed en veilig bereikbaar zijn. Deze eisen staan ook in de VOBB. Het kelder behoud is ook belangrijk bij dit project. Als er wordt gekeken naar de probleemstelling wordt er gezocht naar een concept die in de huidige kelder past. Hoe minder er aan de kelder aangepast hoeft te worden, hoe beter. Selectiecriteria onderhoudsvriendelijkheid en uitvoerbaarheid hebben een weging van drie gekregen. Wanneer een concept minder onderhoud nodig heeft, bespaart dat natuurlijk wat kosten, echter is het minder belangrijk dan de betrouwbaarheid van een concept. Voor de uitvoerbaarheid hetzelfde. Uitvoerbaarheid van een concept is belangrijk maar de bouwtijd er van is belangrijker. Ten slotte wordt monumentenzorg met een weging van 2 afgewogen. Monumentenzorg speelt een belangrijke factor op een ontwerp. Maar omdat de aandrijvingen binnen in de kelder bevinden wordt het niet zwaar meegenomen.

De keuzematrix is ingevuld door [redacted] en de afstudeerder, [redacted] Voor de ingevulde tabellen zie bijlage 7. De concepten zijn beoordeeld met een score van 0-5.

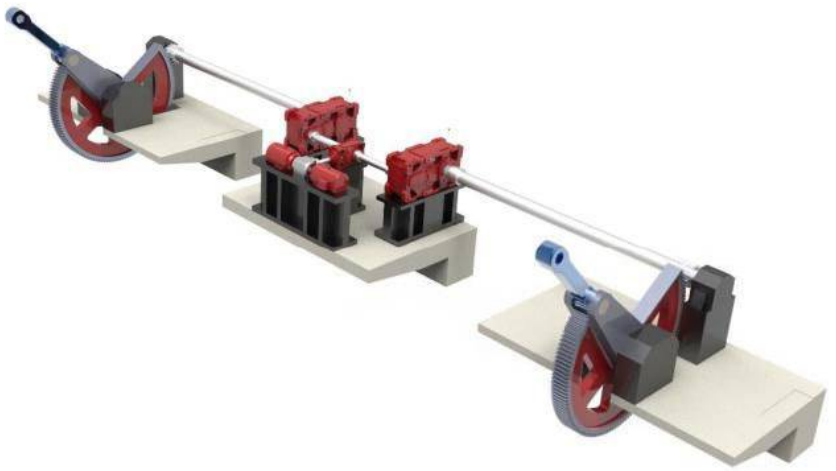
Uiteindelijk concept

Het concept dat als beste is gebleken is concept 3. Omdat de Berlagebrug een rijksmonument is, wilt monumentenzorg zo min mogelijk aanpassingen hebben aan de kelder. Niet alleen de vormgeving buiten maar ook de constructie binnen. Kelder behoud is dus belangrijk. Hierdoor valt concept 2 weg. Uit de keuzematrix is verder ook te zien dat concept 1 de voorkeur niet heeft, voornamelijk bij het beheeraspect. Het concept heeft namelijk veel onderdelen en dus veel onderhoud. Concept 3 is daarentegen vrij eenvoudig, heeft niet veel onderhoud nodig en past ook in de kelder. Om het concept wel goed werkend te krijgen is er voor gekozen om de aandrijving nog via een tandwielkast op te splitsen.

3.3 Detaillering

Bij de detaillering zal het uiteindelijke concept, concept 3, verder worden uitgewerkt. Er worden hier berekeningen gedaan om de onderdelen te kunnen bepalen. Vervolgens wordt er een assembly gemaakt met een onderdelenlijst.

3.3.1 Werking



Figuur 3.14: assembly van het uiteindelijke concept (concept 3)

In het bovenstaande figuur is het 3D model te zien van het uiteindelijke concept. De aandrijvingen bestaan uit twee motoren (één als reserve), een tandwielkast die de aandrijving splitst en twee grotere tandwielkasten die het rondsel aandrijven. Er is voor deze opstelling gekozen zodat de overbrengingen goed verdeeld kunnen worden. De rondsels zullen vervolgens de panamawielen aandrijven. Deze panamawielen hebben een kruk-drijfstangmechanisme die vastzitten aan de ballastkist.

3.3.2 Berekening

Om de onderdelen van concept drie te kunnen bepalen moet de krachten worden berekend die de aandrijvingen aan moeten kunnen. Deze momenten zijn berekend volgens tabel 11 van de VOBB 2016, zie tabel 8.

Momenten op het brugbewegingsmechanisme (motor-as)
De momenten die de motoras minimaal moet aankunnen is berekend volgens tabel 11 van de VOBB 2016. Hier is voor elke belastingssituatie en combinaties berekend wat voor moment er op de motoras komt. Er is vanuit gegaan van een standaard motor met een toerental van 1500 rpm. Verder is er berekend welke totale overbrenging vereist is om de momenten naar de motoras te kunnen herleiden. Deze berekening is te zien in bijlage 9. Het brugbewegingsmechanisme van concept 3 moet een totale overbrenging hebben van 6352 om de gewenste snelheid te bereiken.
Om deze overbrenging te kunnen realiseren is er gekozen voor vier overbrengingen:

- I_1 ; motor-tandwielkast (splitsting van aandrijving in twee). Deze moet een overbrenging hebben van ongeveer 12.

- I_2 ; tandwielkast-tandwielkast. Het tweede tandwielkast is groter en moet een overbrenging hebben van ongeveer 21. Deze tandwielkast drijft het rondsel aan.
- I_3 ; rondsel-panamawiel met een overbrenging van 10.
- I_4 ; de krukdrijfstangmechanisme geeft een vertraging met een gemiddelde overbrenging van $0,4^{-1}$.

Overbelasten overbrenging

Bij de belastingcombinatie overbelasting overbrenging wordt het moment op de motoras berekend bij de volgende belastingsituaties;

- Vasthouden in elke stand,
- Begin openen vanuit gesloten stand,
- Aanvang versnellen/vertragen vanuit open of tussenstand,
- Stoppen van de brugbeweging volgens stopcategorie 0,
- Terugslag na remmen,
- Doorlopen van een verende buffer,
- Aandrukken op opleggingen

Maximum grensmotorkoppel

Voor deze belastingcombinatie is er per belastingsituatie de maximum grensmotorkoppel berekend. De situaties zijn;

- Eenparig bewegen
- Versnellen en vertragen

Maximum toegekend motorkoppel

- Eenparig bewegen
- Versnellen en vertragen

Maximum remkoppel

- Rem als vertragingsrem
- Rem als vasthoudrem

Van elke belastingsituatie is het moment herleid naar de motoras[6]. Het maximale waarde van het moment op de motoras is maximaal 965 Nm, zie de berekeningen in bijlage 9. In onderstaande tabel zijn de resultaten te zien per belastingstingsituatie. Hier zijn ook de maatgevende momenten aangegeven. De hoogste momenten zijn maatgevend voor het bepalen van de onderdelen.

[6] De berekeningen bevatten aannames, de berekende momenten zijn hierdoor niet volledig.

OVERZICHT RESULTATEN – TABEL 11 VAN DE VOBB 2016

Belastingssituatie:	Moment op motoras:
- **Overbelasten overbrenging**	
Vasthouden in elke stand	M_{as1}= 448 Nm
Begin openen vanuit gesloten stand	M_{as2}= 175 Nm
Aanvang versnellen/vertagen vanuit open of tussenstand	M_{as3}= 385 Nm
Invallen remkoppel op volle snelheid	M_{as4}= 714 Nm
Terugslag na remmen	M_{as5}= 865 Nm (Maatgevend)
Doorlopen van een verende buffer	M_{as6}= 743 Nm
- **Maximum grensmotorkoppel**	
Eenparig bewegen	M_{as8}= 251 Nm (Maatgevend)
Versnellen/vertragen	M_{as9}= 234 Nm
- **Maximum toegekend motorkoppel**	
Eenparig bewegen	M_{as10}= 169 Nm
Versnellen/vertragen	M_{as11}= 175 Nm (Maatgevend)
- **Maximum remkoppel**	
Vertragen	M_{as12}= 229 Nm
Vasthouden	M_{as13}= 278 Nm (Maatgevend)

Tabel 3.3: resultaten van de berekende momenten

Zie bijlage 8 voor de volledige berekeningen.

Met de resultaten zijn de maatgevende koppels bepaald. Het nominale koppel van de motor is de maximale waarde van het toegekend motorkoppel, 175 Nm. De maximale koppels op het bewegingswerk worden berekend met het hoogste moment op de motoras. Dus $M_{as.01}$= 865 Nm.

Het maximale koppel dat sprake is bij de eerste tandwielkast is:

$$M_{max.o.2} := i_1 \cdot M_{as.o1} = 10809\,N\cdot m \qquad \text{Met } i_1=12,5$$

Verder moet volgens de VOBB de motor worden getoetst op een belasting die gelijk is aan 2/3 van de gezamenlijke belasting. De motor is in werking bij de belastingssituatie 'begin openen vanuit gesloten stand' en 'aanvang versnellen/vertragen vanuit open stand'. Door deze belastingen te vermenigvuldigen met 2/3 geeft:

Begin openen vanuit gesloten stand $$M_{as.2} := \frac{2}{3}\cdot 2\cdot M_{as2} = 233\,N\cdot m$$

Aanvang versnellen/vertragen vanuit open stand $$M_{as.3} := \frac{2}{3}\cdot 2\cdot M_{as3} = 514\,N\cdot m$$

De maximale koppel die opgenomen wordt door de tweede tandwielkast:

$$M_{max.o.3} := i_1 \cdot i_2 \cdot \max\left(M_{as.o1}, M_{as.2}, M_{as.3}\right) \cdot \frac{1}{2} = 112 \cdot kN \cdot m$$ Met i_2= 20,73

Doordat hier de aandrijving al in twee is gesplitst wordt de koppel nog door twee gedeeld.

Motor

Bij de motor is de maatgevende waarde het nominale koppel. Met deze koppel is het vermogen uitgerekend. Verder is er een bedrijfsfactor erbij genomen. Dit is gedaan omdat de motor niet continu in gebruik is. Bedrijfsfactor (b) van 0,8 staat voor belastingstype II. Deze worden matig belast en het aantal bedrijfsuren is per dag ongeveer twee uur. Dit geeft dan een vermogen van:

$$P_m := M_{nom1} \cdot \omega \cdot b \qquad P_m = 21.9 kW$$

Er is gekozen voor een vermogen van 30 kW. Dit geeft dan een nominale waarde van 191 Nm.

De motor die hiervoor is gekozen:
Type; draaistroom kortsluitmotor (DRE 200L4)
P; 30kW x 1500 rpm
T_{nom}; 194 Nm
Uitgaande as; rond 55

Tandwielkast 1 – splitsing aandrijving in twee

Het maximale koppel dat op tandwielkast 1 werkt is 10,81 kNm. Maar omdat de VOBB veel factoren meerekent die worden gebruikt in de civiele techniek worden hierdoor de tandwielkasten over dimensioneert. Hiervoor heeft SEW factoren vastgesteld om de juiste tandwielkasten te kunnen bepalen:

Overbelasten: $\gamma_o := 1.5$ $\gamma_{ro} := 0.9$

$$M_{N2.O} := \gamma_{ro} \cdot \frac{M_{max.o.2}}{\gamma_o} \qquad M_{N2.O} = 6.49 kN \cdot m$$

De eerste tandwielkast moet dus een koppel van 6,49 kNm aankunnen. De tandwielkast die uiteindelijk is gekozen:

Type; SEW – X2K110, i=12,5 (2-traps)
Bouwvorm; evenwijdige assen
N_2; 118 rpm
M_{N2}; 8,50 kNm

Tandwielkast 2 – aandrijving rondsel

Voor tandwielkast twee is hetzelfde gedaan zoals de eerste tandwielkast, namelijk:

Maximale koppel: $M_{max.o.3} = 112.04 kN \cdot m$

Overbelasten: $\gamma_o := 1.5$ $\gamma_{ro} := 0.9$

$$M_{N2.O} := \gamma_{ro} \cdot \frac{M_{max.o.}}{\gamma_o} \qquad M_{N2.O} = 67.22\,kN{\cdot}m$$

De tandwielkast die uiteindelijk is gekozen:

Type;	SEW – X3F200, i=20,73 (3-traps)
Bouwvorm;	evenwijdige assen
N_2;	48 rpm
M_{N2};	77,6 kNm (79 kNm)

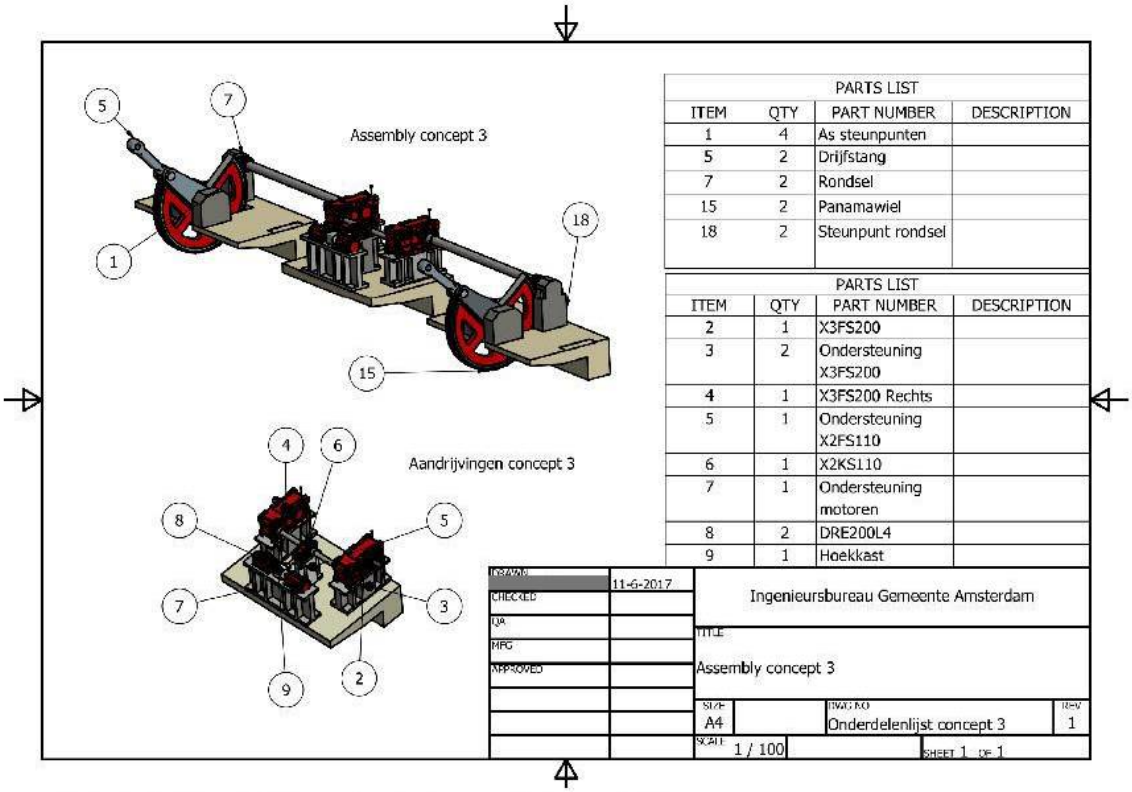
Rondsel en panamawiel

Het rondsel en het panamawiel moet een overbrenging hebben van 10. Het VOBB heeft verder aan dat het minimaal aantal tanden 12 moet zijn. Er is daarom voor het rondsel gekozen voor Z_2= 14 tanden. Hierdoor moet dus het panamawiel een aantal tanden hebben van Z_3= 140. Met een tandafstand van 20mm geeft dit een diameter van:

- Rondsel d_2=280mm
- Panamawiel d_3= 2800mm

Zie bijlage 9 voor de volledige berekeningen.

3.3.3 Onderdelenlijst



Figuur 3.15: assembly van het uiteindelijke concept met onderdelenlijst

In figuur 3.15 zijn de onderdelen van de assembly te zien. De aandrijvingen zijn symmetrisch opgesteld en liggen zoals al gezegd op drie betonnen bordessen die aan de muur worden bevestigd. De aandrijvingen kunnen in de kelder geplaatst worden zonder dat het brugval af hoeft. De aandrijvingen kunnen dus eerst worden geplaatst, het val kan later worden vervangen. Wegbelemmering wordt hierdoor verminderd. Het oude bewegingswerk kan ook behouden worden. Deze kunnen in de kelder blijven.

Wat in de bovenstaande figuur te zien is, is echter alleen de hoofdaandrijving. Remvoorzieningen en de handaandrijving zijn nog niet in het concept verwerkt.

4 Conclusies en aanbevelingen

4.1 Conclusie

De Berlagebrug voldoet momenteel niet meer aan de nieuwe eisen. Dit betekend dus dat het vervangen of gerenoveerd moet worden. Hiervoor heeft de afstudeerder de opdracht gekregen om 30 juni 2017 een conceptueel ontwerp te leveren van een nieuw bewegingswerk dat in de huidige basculekelder geplaatst kan worden.

Gebaseerd op de opdracht en probleemstelling luidt de onderzoeksvraag als volgt: 'Hoe kunnen de moderne aandrijving en de vernieuwde brug, die voldoen aan de huidige eisen, aangesloten worden op de bestaande basculekelder van de Berlagebrug?'

Om tot een uiteindelijk ontwerp te komen is er eerst onderzoek gedaan naar de Berlagebrug en de kelder. Hieruit was er te zien dat het bewegingswerk momenteel uit velen onderdelen bestaat. Dit vergt dus veel onderhoud. Verder is er een onderzoek gedaan naar de normen en eisen. Bij het vergelijken van de oude VOBB met de vernieuwde VOBB (NEN 6786 2016) is gebleken dat er veel factoren zijn aangepast. Hierdoor moet het bewegingswerk opnieuw worden berekend en vervangen worden.

Met behulp van een functieanalyse en een morfologisch overzicht zijn er drie concepten bedacht:
- Concept 1: moderne versie van de bestaande aandrijvingen.
- Concept 2: Panamawiel met twee ballastkisten.
- Concept 3: Panamawiel met drie ballastkisten.

Het concept dat als beste is gebleken is concept 3. Dit concept past in de huidige kelder zonder drastische veranderingen. Het bevat drie betonnen bordessen die aan de muur zijn bevestigd. In het midden bordes liggen twee motoren die met een hoekkast naar de tandwielkasten gaan. Het rondsel gaat met een as naar de andere bordessen waar de panamawielen liggen. Het panamawiel bevat een krukdrijfstangmechanisme die bevestigd is aan de ballastkist.

4.2 Aanbevelingen

Op dit moment is concept drie als beste gebleken Het concept is op dit moment door [redacted] en de afstudeerder [redacted] gekozen. Dat betekend dus niet dat de andere concepten al meteen worden uitgesloten. Het is aan te bevelen om alle drie de concepten nog mee te nemen in het proces. Verder zijn de berekeningen nog niet volledig. Er zijn veel aannames gedaan waardoor de berekende momenten niet nauwkeurig zijn. De berekeningen moeten daarom nog gecontroleerd worden. Verder is omwille van de tijd alleen de hoofdaandrijvingen bepaald. Remvoorzieningen, handaandrijving en assen zijn niet meegenomen in het detailleringsfase. Deze zullen dus nog berekend en ontworpen moeten worden om het concept volledig aan de eisen te laten voldoen.

Bronvermelding

CIV. (2017). *Vaarwegen in Nederland.* Rijkswaterstaat.

Civiele kunstwerken. (1997). Ten Hagen Stam uitgevers.

Gemeente Amsterdam. (sd). *Ruimte en Economie*. Opgeroepen op Maart 13, 2017, van Gemeente Amsterdam: https://www.amsterdam.nl/bestuur-organisatie/organisatie/ruimte-economie/

Gemeente amsterdam. (sd). *Werkvelden*. Opgeroepen op Maart 13, 2017, van Gemeente Amsterdam Ingenieursbureau: https://www.amsterdam.nl/ingenieursbureau/werkvelden/

[redacted] (sd). *2000 jaar Beweegbare bruggen.* Rijswijk: Uitgeverij Elmar B.V. Opgeroepen op Maart 13, 2017

[redacted] (sd). *Panamawiel*. Opgeroepen op April 2017, 2017, van Jansen Venneboer: http://www.jansen-venneboer.com/machinebouw/bewegingswerken/panamawiel/

[redacted] (sd). *Civiele constructies*. Opgeroepen op Maart 13, 2017, van Gemeente Amsterdan Ingenieursbureau: https://www.amsterdam.nl/ingenieursbureau/werkvelden/civiele_constructies/

[redacted] (sd). *Bovenbouw*. Opgeroepen op Maart 15, 2017, van Bruggen lexicon: http://bruggenlexicon.nl/index.php/9-b/37-bovenbouw

NEN. (2001). *NEN 6786 (nl).* Opgeroepen op Maart 13, 2017

NEN. (2001). *NEN 6786 (nl).* Nederlands Normalisatie-instituut. Opgeroepen op Maart 13, 2017

NEN. (2003). *NEN 6787 (nl.* Opgeroepen op Maart 13, 2017

NEN. (2003). *NEN 6787 (nl.* Nederlands Normalisatie-instituut. Opgeroepen op Maart 13, 2017

NEN. (2011). *Beoordelen van bestaande bouwconstructies: NEN 8700*. Opgeroepen op Maart 14, 2017, van NEN: https://www.nen.nl/NEN-Shop/Eurocodes/Beoordelen-van-bestaande-bouwconstructies-NEN-8700.htm

NEN. (2011). *NEN 8700 (nl).* Delft: Nederlands Normalisatie-instituut.

NEN. (2015). *NEN-EN 1991-2+C1.* Delft: Nederlands Normalisatie Instituut.

NEN. (2016). *NEN 6786 (nl).* Opgeroepen op Maart 13, 2017

NEN. (2016). *NEN 6786 (nl).* Nederlands Normalisatie-instituut. Opgeroepen op Maart 13, 2017

Rijksmonumenten. (2014, December 10). *Schollenbrug (brug nr. 340) en Berlagebrug (brug nr. 423) in Amsterdam*. Opgeroepen op Maart 8, 2017, van Rijksmonumenten: http://rijksmonumenten.nl/monument/530055/schollenbrug-brug-nr-340-en-berlagebrug-brug-nr-423/amsterdam/

[redacted] (2015). *Herijking bestaande bruggen.* Constructies en Installatie. Amsterdam: Ingenieursbureau gemeente amsterdam.

Bijlage(n)

Bijlage(n) **39**
Bijlage 1 - Vaste bruggen 40
Bijlage 2 - Onderdelen van het val 41
Bijlage 3 - Belangrijke eisen VOBB 45
Bijlage 4 - Verschillen NEN 6786 (VOBB) 47
Bijlage 5 - Evenwichtsberekening 50
Bijlage 6 - Berekeningen belastingen & krachten 56
Bijlage 7 - Keuzematrix 59
Bijlage 8 - Tabel 11 VOBB 2016 60
Bijlage 9 - Berekeningen bewegingswerk 61

Bijlage 1 - Vaste bruggen

Er zijn in de loop van de tijd verschillende soorten vaste bruggen ontstaan:

- Schipbruggen
- Houten en stenen bruggen
    - Romeinse bruggen
    - Middeleeuwse bruggen
- Stalen bruggen
    - Hangbrug
    - Tuibrug
    - Kokerliggerbrug
    - vakwerkbrug
    - Boogbrug
    - Plaatliggerbrug
    - Kraamarmbrug/cantileverbrug

Van de genoemde vaste bruggen zijn alleen de plaatliggerbrug, de vakwerkbrug, de tuibrug en de schipbrug bruikbaar als beweegbare brug.

Plaatliggerbrug
De plaatliggerbrug bestaat uit twee vollewand hoofdliggers (ook wel plaatliggers) met daartussen de rijvloer, een balkrooster met daarop een houten wegdek. Dankzij lastechnieken kwam na 1945 ook nog een orthotrope plaat. Daarmee werd de rijvloer veel lichter dan met het traditionele balkrooster. Een orthotrope plaat bestaat uit een stalen dekplaat, met bovenzijde voorzien van een slijtlaag en aan de onderzijde verstijfd door middel van langs verstijvingen, strips of troggen, en dwarsdragers.

Vakwerkbrug
Vakwerkbrug bestaat uit een ligger die is opgebouwd uit driehoekige vakken. Deze brug is er in enkelvoudige, dubbele en drievoudige vorm.

Tuibrug
De tuibrug bestaat uit een ligger, gedragen door (hoogwaardige) stalen tuien die gespannen zijn tussen een pyloon en de ligger. De krachten worden door de tuien overgedragen aan de pyloon. Verder gedragen de tuien zich als steunpunten die het draagvermogen van de ligger vergroten.

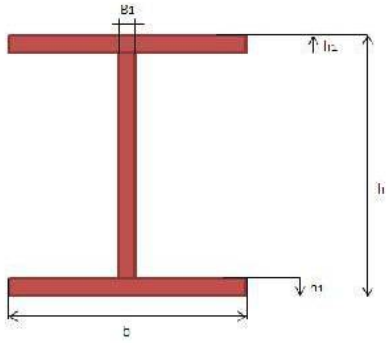
Schipbrug
Een schipbrug bestaat uit een aantal schepen die aan de oever of rivierbodem zijn geankerd. Deze brugsoort is een van de eerste bruggen die er zijn gemaakt. Zo is er ook nog een versie waarin enorme ankers werden gebruikt met daar tussen openingen om kleine schepen door te laten.

Bijlage 2 - Onderdelen van het val

Onderdelen het val, Berlagebrug

Zie pagina 44 voor de indeling van het val, met de aangegeven hoofdliggers, dwarsdragers en hoek/steunplaten.

Hoofdliggers[7]:



1) h= 500 mm
   h1= 25 mm
   b= 300 mm
   b1= 12 mm

2) h= 600 mm
   h1= 37 mm
   b= 300 mm
   b1= 12 mm

3) h= 750 mm
   h1=37 mm
   b= 300 mm
   b1= 12 mm

4) h= 950 mm
   h1= 49 mm
   b= 300 mm
   b1= 12 mm

5) h= 1000 mm
   h1= 49 mm
   b= 300 mm
   b1= 12 mm

6) h= 1000 mm
   h1= 37 mm
   b= 300 mm
   b1= 12 mm

[7] hoogte h1 is de dikte van het I-profiel + de dikte van eventuele hoekplaten (versterkingen).

7) h= 1200 mm
h1= 37 mm
b= 300 mm
b1= 12 mm

8) h= 500 mm
h1= 26 mm
b= 350 mm
b1= 12 mm

9) h= 600 mm
h1= 26 mm
b=350 mm
b1= 12 mm

10) h= 750 mm
h1= 38 mm
b= 350 mm
b1= 12 mm

11) h= 950 mm
h1= 38 mm
b= 350 mm
b1= 12 mm

12) h= 1000 mm
h1= 38 mm
b= 350 mm
b1= 12 mm

13) h= 1000 mm
h1= 38 mm
b= 350 mm
b1= 12 mm

14) h= 1200 mm
h1= 38 mm
b= 350 mm
b1=12 mm

Dwarsdragers:

21) h= 500 mm
h1= 22 mm
b= 200 mm b1= 10 mm

22) h= 550 mm
h1= 26 mm
b= 220 mm
b1= 10 mm

23) h= 640 mm
h1= 27 mm
b= 220 mm
b1= 10 mm

24) h= 850 mm
h1= 28 mm
b= 220 mm
b1= 10 mm

25)
a. h= 424 mm
h1= 12mm
b= 180 mm
b1= 10 mm
b. IPE400;
h= 400 mm
h1= 13,5 mm
b= 180 mm
b1= 8,6 mm

26) h= 1200 mm
h1= 28 mm
b= 220 mm
b1= 10 mm

27) h= 1000 mm
h1= 29 mm
b= 250 mm
b1= 10 mm

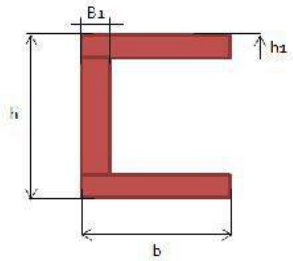
28) Zie dwarsdrager 27.

29) Zie dwarsdrager 27.

30) h= 984 mm
h1= 32 mm
b= 180 mm
b1= 10 mm

Hoekplaten:

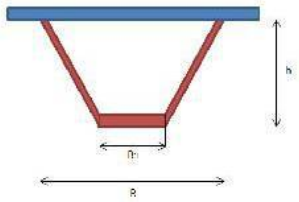
- UNP300;
  h= 300 mm
  h1= 16 mm
  b= 100 mm
  b1= 10 mm



Trogliggers:

1) h= 230 mm
   B= 300 mm
   B1= 170 mm
   d= 8 mm[8]

2) h= 234 mm
   B= 368 mm
   B1= 186 mm
   d= 8 mm



Dekplaten:

1) L= 14000 mm
   B= 5060 mm
   d= 16 mm

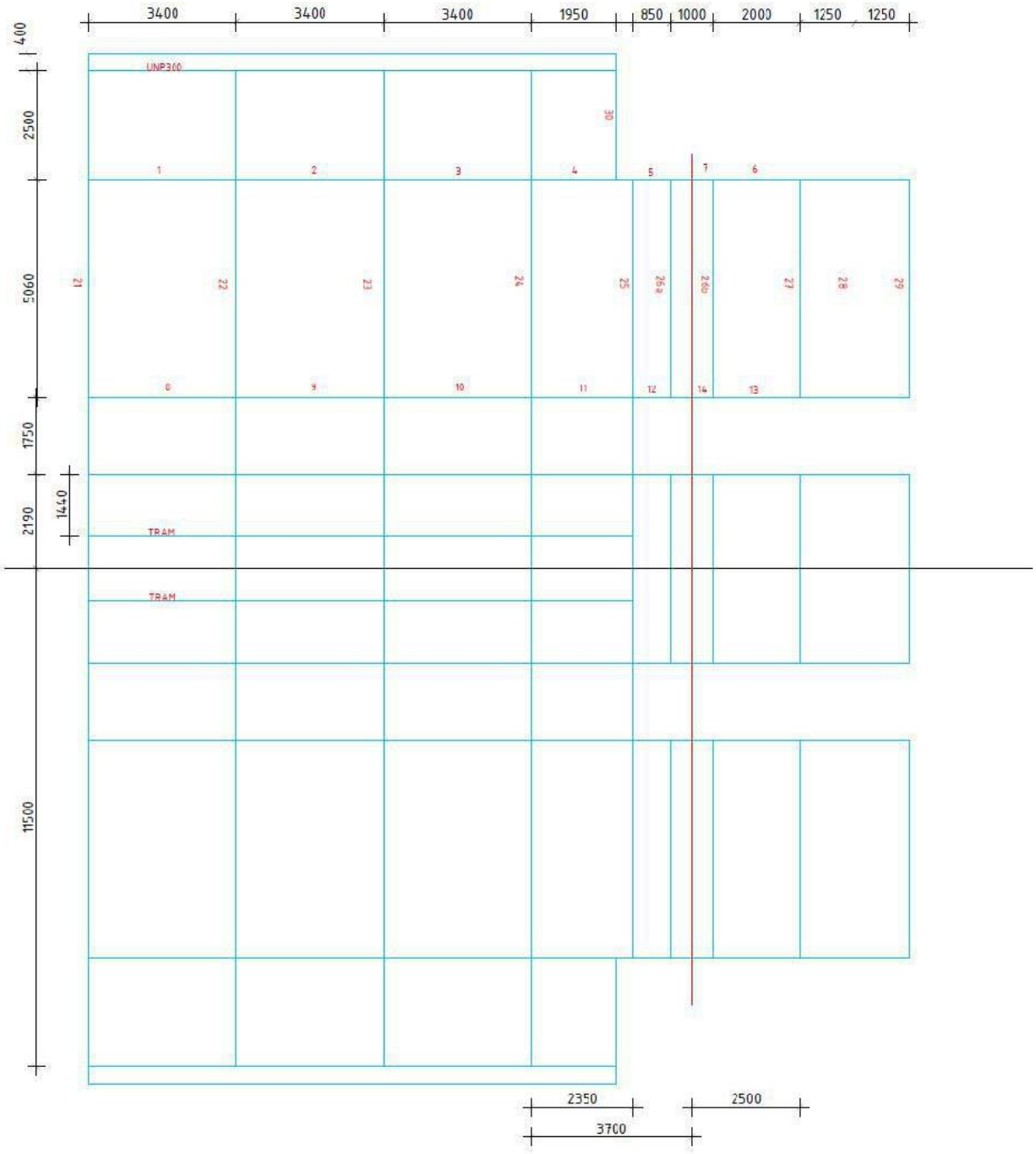
2) L= 14000 mm
   B= 1750 mm
   d= 16 mm

3) L= 13000 mm
   B= 2500 mm
   d= 16 mm

Dekplaat 1 bestaat uit acht trogliggers (type 1) per plaat met een hart op hart afstand van 500 mm. Dekplaat 2 heeft twee trogliggers (type 1) met een hart op hart afstand van 520 mm. In het middenstuk liggen er nog twee trogliggers van type 2 ter ondersteuning van de tram. Deze zitten ten opzichte van de zijkanten met een hart op hart afstand van 720 mm.

[8] d = de dikte van de trogligger.

Overzichtstekening van het val:



Bijlage 3 - Belangrijke eisen VOBB

Enkele belangrijke eisen NEN 6786:

- De samenwerkende onderdelen moeten tijdens de brugbeweging vrij van elkaar kunnen bewegen.
- De mechanische uitrusting van een beweegbare brug is berekend aan de hand van de in NEN 6786 gegeven grondslagen. De mechanische uitrusting en de elektrische installatie is beveiligd tegen o.a.:
    - Te grote motorkoppels;
    - Te grote drukken;
    - Leiding- en slangbreuk;
    - Te laat vloeistofniveau;
    - Weigering van apparatuur;
- De constructieve levensduur van beweegbare bruggen met een staalconstructie bedraagt 100 jaar, tenzij anders is overeengekomen, voor mechanische uitrusting 50 jaar, hydraulische installatie en voor elektrische installatie 25 jaar.
- Voor de mechanische uitrusting moet aangenomen worden dat de brug gedurende 50 jaar van de constructieve levensduur 500 000 maal geopend wordt.
- Het ontwerp van de beweegbare brug moet zo zijn ontworpen dat het plegen van onderhoud en inspecties veilig kan worden uitgevoerd.
- De elektrische aangedreven mechanismen moet bij storing met de hand of andere voorzieningen kunnen worden bewogen.
- Met hydraulische installaties en mechanische uitrusting die gebruik maken van vloeistoffen (olie, vet etc.) moeten zich aan de milieuvoorschriften van de Arbowet voldoen. Enkele belangrijke aspecten van dit voorschrift:
    - Gevolgen van bezwijken van leidingen verminderen;
    - Brandgevaar voorkomen;
    - Geluidshinder voorkomen (voornamelijk voor hydraulische installaties).
- Tijd voor het versnellen of vertragen en de noodstop van de brug:
    - Indien door een motor met ongeregelde snelheid wordt aangedreven is de tijd voor het versnellen of vertragen 6 s voor bruggen met een oppervlakte van het val kleiner dan 125 m^2;
    - 12 s voor bruggen met een oppervlakte van het val gelijk aan of groter dan 125 m^2 en voor bruggen met een mechanische retardeerinrichting;
    - 12 s voor het vertragen van de brug, indien aangedreven door een motor met geregelde snelheid;
    - 3 s om met een noodstop bruggen met een val kleiner dan 125 m^2 van nominale snelheid tot stilstand te brengen;
    - 6 s stilstand met noodstop voor bruggen met een oppervlakte van het val gelijk aan of groter dan 125 m^2.

(NEN, 2001)

Enkele belangrijke eisen NEN 6787:

- Er moeten voorzieningen worden getroffen die voorkomen dat onbevoegden onder alle omstandigheden bij bedieningsplaatsen, machineruimtes, overige besloten ruimtes en beweegbare delen van de brug komen.
- Toegang tot de bedieningsruimtes worden geplaatst buiten de zone waar aanrijdgevaar is door landverkeer. Deze toegangen moet je veilig kunnen bereiken en verlaten.
- Aandrijfsystemen moeten zo ontworpen zijn dat de onderdelen die voor onderhoud regelmatig geïnspecteerd/vervangen moeten worden goed en veilig bereikbaar zijn.
- Het aandrijfsysteem moet goed tegen trillingen kunnen, onderdelen mogen niet los kunnen trillen.
- Bij mechanische aandrijvingen moeten open tandwiel- en kabel- en kettingoverbrengingen voorzien zijn van een afscherming.
- De brug moet worden voorzien van de volgende remvoorzieningen die de brug tot stilstand kunnen brengen en/of in positie kunnen houden;
    - Een remvoorziening die als onderdeel van het reguliere brugbewegingsproces de brug tot stilstand brengt (vertragingsrem);
    - Een remvoorziening die de brug vasthoudt in een gedefinieerde stand (vasthoud/parkeerrem);
    - Een noodremvoorziening die de brug in veilige toestand brengt bij gevaarlijke situaties dooringrijpen van de besturing en/of gebruik van noodstopvoorziening.
- Deze remvoorzieningen zijn zo ontworpen dat bij stroomuitval de remvoorzieningen automatisch in remmende toestand wordt gebracht.
- Er moet een inrichting zijn aangebracht die de juiste ligging van de brug kan controleren en afwijkingen kan detecteren. De aspecten die minimaal gedetecteerd moeten worden:
    - Goede ligging op de opleggingen;
    - Bij railverkeer: de juiste ligging van de spoorstaafovergangen;
    - De juiste stand van de grendelinrichting (indien van toepassing)

(NEN, 2003)

Bijlage 4 - Verschillen NEN 6786 (VOBB)

Hoofdstuk	Beschrijving	Verandering/verschil	p.NEN 6786	p. VOBB (2016)
Termen en definities	Aandrijfmechanisme	Inspectiewagens (inclusief) rijwerk worden niet verstaan onder aandrijfmechanisme	17	12
Termen en definities	representatieve waarde van de belasting	Karakteristieke waarde = Qk, gelijktijdige waarde = ΨQk toegevoegd	24	15
Termen en definities	Spanningsverandering	Spanningsinterval wordt aangegeven met: ΔQr	29	16
Termen en definities	Spanningsverhouding	Opmerking toegevoegd: waarde k ligt tussen -1 en 1		
Eenheden en grootheden	Grenstoestand (GT)	Meerdere afkortingen	33	18
Eenheden en grootheden	Dynamisch draaggetal	is dynamische factor = c_d	33	18
Eenheden en grootheden	Afmetingsfactor	Toegevoegd = c_s	33	18
Eenheden en grootheden	Voorspankracht, klemkracht (Fp)	Voorspankracht = $F_{p,Cd}$ en klemkracht = $F_{klemkracht, Rd}$	35	24, 26
Eenheden en grootheden	Vermoeiingssterkte	Onderverdeeld in meerdere afkortingen	33	18
Eenheden en grootheden	Contactsterkte	Onderverdeeld in meerdere afkortingen	35	24, 25, 27, 28
Eenheden en grootheden	Treksterkte (Ft)	Nominale waarde van treksterkte = F_u	35	18
Eenheden en grootheden	Afschuivingsmodulus	G = glijdingsmodulus	35	18
Eenheden en grootheden	Moment/koppel (M)	Onderverdeel in meerdere afkortingen en veranderd in benamingen	35	21
Constructieve uitgangspunten	Het moment van de benodigde ballast	Toegevoegd: Mag met +5% of -5% gewijzigd worden	45	31
Constructieve uitgangspunten	Onnauwkeurigheid berekening	Onnauwkeurigheid van 2% wordt niet meer aangegeven	45	31
Aandrijfmechanismen	Aandrijfmechanismen, elektromechanisch en elektrohydraulisch	Uitgebreid met meerdere normen	49	31
Basisvariabelen	Belastingen en externe invloeden	Extra uitleg belastingen	-	34
Grenstoestanden	Uiterste grenstoestanden	Materiaalfactoren worden aangegeven in een tabel + Berekening waaraan materialen zich moet voldoen	61	85
Voorwaarden	Materialen	Uitgebreid met meerdere normen	69	77
Voorwaarden	Gietstaal	Toegevoegd: geen hogere vloeigrens van 360 Mpa, koolstofequivalent niet hoger dan 0,42	71	79
Representatieve waarden van belastingen	Wind	Windbelasting moet voor bascule-, ophaal- en draaibruggen zijn herleid tot een moment	85	34

		$M_{w;brug}$ * Extra factor 1,05		
Representatieve waarden van belastingen	Wind	Stuwkracht = qp(ze)	85	34
Representatieve waarden van belastingen	Wind	En voor hefbruggen moet de windbelasting zijn herleid tot een kracht $F_{w;brug}$ * Extra factor 1,05	85	35
Representatieve waarden van belastingen	Stuwdruk	Tabel 1 is veranderd naar aantal uren per jaar ipv aantal dagen, waardes zijn hetzelfde	89	38
Representatieve waarden van belastingen	Stuwdruk	Formule rekent nu ipv uurgemiddelde met 10 min gemiddelde windsnelheid om stuwdruk te bepalen	93	39
Representatieve waarden van belastingen	Stuwdruk	Tabel 3 aangepast	93	42
Representatieve waarden van belastingen	Stuwdruk	Ruwheidslengte is vastgesteld = 0,2. Geen gebieden (I, II, III) meer	94	43
Representatieve waarden van belastingen	Temperatuur	Volledig aangepast	101	44
Representatieve waarden van belastingen	Wrijving	Tabel 4 is aangepast	105	46
Representatieve waarden van belastingen	brugbewegingsmechanisme	Bij tabel wordt sneeuw niet als belasting meegenomen	125	56
Representatieve waarden van belastingen	brugbewegingsmechanisme (elektro mechanisch)	Tabel 11 aangepast, andere factoren en extra formule	137	58
Representatieve waarden van belastingen	brugbewegingsmechanisme (elektro hydraulisch)	Tabel 12 aangepast, andere factor en extra formule	143	63
Representatieve waarden van belastingen	brugbewegingsmechanisme (hydraulisch)	Aparte tabel toegevoegd voor hydraulische installaties	-	64
Representatieve waarden van belastingen	brugbewegingsmechanisme (hand aangedreven)	Tabel aangepast, andere factoren		
Representatieve waarden van belastingen	Rekenwaarde van krachten op de vastzetinrichting	Tabel aangepast, formule heeft een extra combinatiewaarde	153	70
Representatieve waarden van belastingen	Rekenwaarden van de krachten en momenten op opzet-, grendel- en centreermechanisme	Tabel aangepast, andere factoren (vermoeiing overbrenging)	157	72
Representatieve waarden van belastingen	Contragewichtkabels	Formule aangepast + belastingsfactor anders	159	73
Representatieve waarden van belastingen	Rekenwaarden van de krachten op hoofddraaipunten	Formule van belastingssituatie vermoeiing geen factor γ	161	75
Beoordeling van de onderdelen van de mechanische uitrusting	Materialen	Uitgebreid + normen carboneerstaal, smeedstaal en roestvaststaal toegevoegd	167	78
Beoordeling van de onderdelen van de mechanische uitrusting	vermoeiingssterkte materialen	Nominale vermoeiingsterkte wordt per materiaal aangegeven	173	80
Beoordeling van de onderdelen van	Representatieve waarde	Waarde elasticiteitsmodules van grijs	173	83

de mechanische uitrusting	materialen	gietijzer aangepast		
Beoordeling van de onderdelen van de mechanische uitrusting	Materiaalfactoren	Tabel aangepast, andere factoren	177	86
Beoordeling van de onderdelen van de mechanische uitrusting	Kerffactoren	Formule toegevoegd voor situatie met twee kerven: $k = 1 + (k_{.,1} - 1) + (k_{.,2} - 1)$	181	96
Beoordeling van de onderdelen van de mechanische uitrusting	Wohlerlijn	Grafiek Wöhlerlijn voor spanningen met constante amplitude niet toegevoegd	190	102

Bijlage 5 - Evenwichtsberekening

Gemeente Amsterdam
Ingenieursbureau
SBI

Evenwichtsberekening verkeersbrug

Werk : Brug 423 - Berlagebrug
Opsteller : San San Nguyen

Onderdeel	aantal	lengte	breedte	dikte	eenheids-massa	soortelijke massa	massa	Hoogte afmeting a	Lengte afmeting c	afstand X	afstand Y	polair traag-heidsmoment.
	st	m	m	m	kg/m	kg/m3	kg	m	m	m	m	kg.m2
Dekplaat 1	3	14,000	5,060	0,016	635,54	7850	26.692,5	0,016	14,000	8,350	0,872	2.317.343
Dekplaat 2	2	14,000	1,750	0,016	219,80	7850	6.154,4	0,016	14,000	8,350	0,872	534.302
Dekplaat 3	2	13,000	2,500	0,016	314,00	7850	8.164,0	0,016	13,000	9,600	0,872	873.579
Hoofdligger 1 bovenflens	2	3,400	0,300	0,025	58,88	7850	400,4	0,025	3,400	13,550	0,760	74.122
Hoofdligger 1 lijfplaat	2	3,400	0,012	0,450	42,39	7850	288,3	0,450	3,400	13,550	0,522	53.285
Hoofdligger 1 onderflens	2	3,400	0,300	0,025	58,88	7850	400,4	0,025	3,400	13,550	0,335	73.936
Hoofdligger 2 bovenflens	2	3,400	0,300	0,037	87,14	7850	592,5	0,037	3,400	10,150	0,754	61.950
Hoofdligger 2 lijfplaat	2	3,400	0,012	0,526	49,55	7850	336,9	0,526	3,400	10,150	0,472	35.119
Hoofdligger 2 onderflens	2	3,400	0,300	0,037	87,14	7850	592,5	0,037	3,400	10,150	0,299	61.666
Hoofdligger 3 bovenflens	2	3,400	0,300	0,037	87,14	7850	592,5	0,037	3,400	6,750	0,754	27.904
Hoofdligger 3 lijfplaat	2	3,400	0,012	0,726	68,39	7850	465,0	0,726	3,400	6,750	0,372	21.721
Hoofdligger 3 onderflens	2	3,400	0,300	0,037	87,14	7850	592,5	0,037	3,400	6,750	0,041	27.568
Hoofdligger 4 bovenflens	2	1,950	0,300	0,049	115,40	7850	450,0	0,049	1,950	4,075	0,748	7.867
Hoofdligger 4 lijfplaat	2	1,950	0,012	0,852	80,26	7850	313,0	0,852	1,950	4,075	0,297	5.343
Hoofdligger 4 onderflens	2	1,950	0,300	0,049	115,40	7850	450,0	0,049	1,950	4,075	-0,154	7.627
Hoofdligger 5 bovenflens	3	0,850	0,300	0,049	115,40	7850	294,3	0,049	0,850	0,925	0,748	434
Hoofdligger 5 lijfplaat	3	0,850	0,012	0,902	84,97	7850	216,7	0,902	0,850	0,925	0,272	229
Hoofdligger 5 onderflens	3	0,850	0,300	0,049	115,40	7850	294,3	0,049	0,850	0,925	-0,204	282
Hoofdligger 8 bovenflens	4	3,400	0,350	0,026	71,44	7850	971,5	0,026	3,400	13,550	0,759	179.868
hoofdligger 8 lijfplaat	4	3,400	0,012	0,448	42,20	7850	573,9	0,448	3,400	13,550	0,522	106.096
Hoofdligger 8 onderflens	4	3,400	0,350	0,026	71,44	7850	971,5	0,026	3,400	13,550	0,285	179.388
Hoofdligger 9 bovenflens	4	3,400	0,350	0,026	71,44	7850	971,5	0,026	3,400	10,150	0,759	101.584
Hoofdligger 9 lijfplaat	4	3,400	0,012	0,548	51,62	7850	702,1	0,548	3,400	10,150	0,472	73.178
Hoofdligger 9 onderflens	4	3,400	0,350	0,026	71,44	7850	971,5	0,026	3,400	10,150	0,185	101.057

Hoofdligger 10 bovenflens	4	3,400	0,350	0,038	104,41	7850	1.419,9	0,038	3,400	6,750	0,753	66.868
Hoofdligger 10 lijfplaat	4	3,400	0,012	0,674	63,49	7850	863,5	0,674	3,400	6,750	0,397	40.343
Hoofdligger 10 onderflens	4	3,400	0,350	0,038	104,41	7850	1.419,9	0,038	3,400	6,750	0,041	66.065
Hoofdligger 11 bovenflens	4	3,700	0,350	0,038	104,41	7850	1.545,2	0,038	3,700	3,200	0,753	18.462
Hoofdligger 11 lijfplaat	4	3,700	0,012	0,874	82,33	7850	1.218,5	0,874	3,700	3,200	0,297	14.053
Hoofdligger 11 onderflens	4	3,700	0,350	0,038	104,41	7850	1.545,2	0,038	3,700	3,200	-0,159	17.625
Hoofdligger 12 bovenflens	3	0,850	0,350	0,038	104,41	7850	266,2	0,038	0,850	0,925	0,753	395
Hoofdligger 12 lijfplaat	3	0,850	0,012	0,924	87,04	7850	222,0	0,924	0,850	0,925	0,272	235
Hoofdligger 12 onderflens	3	0,850	0,350	0,038	104,41	7850	266,2	0,038	0,850	0,925	-0,289	266
Dwarsdrager 21 bovenflens	3	5,060	0,200	0,022	34,54	7850	524,3	0,022	5,060	15,250	0,761	123.359
Dwarsdrager 21 lijfplaat	3	5,060	0,010	0,456	35,80	7850	543,4	0,456	5,060	15,250	0,522	127.687
Dwarsdrager 21 onderflens	3	5,060	0,200	0,022	34,54	7850	524,3	0,022	5,060	15,250	0,283	123.097
Dwarsdrager 22 bovenflens	3	5,060	0,220	0,026	44,90	7850	681,6	0,026	5,060	11,850	0,759	97.561
Dwarsdrager 22 lijfplaat	3	5,060	0,010	0,498	39,09	7850	593,4	0,498	5,060	11,850	0,497	84.756
Dwarsdrager 22 onderflens	3	5,060	0,220	0,026	44,90	7850	681,6	0,026	5,060	11,850	0,235	97.206
Dwarsdrager 23 bovenflens	3	5,060	0,220	0,027	46,63	7850	707,8	0,027	5,060	8,450	0,759	52.458
Dwarsdrager 23 lijfplaat	3	5,060	0,010	0,586	46,00	7850	698,3	0,586	5,060	8,450	0,452	51.513
Dwarsdrager 23 onderflens	3	5,060	0,220	0,027	46,63	7850	707,8	0,027	5,060	8,450	0,146	52.066
Dwarsdrager 24 bovenflens	3	5,060	0,220	0,028	48,36	7850	734,0	0,028	5,060	5,050	0,758	20.708
Dwarsdrager 24 lijfplaat	3	5,060	0,010	0,794	62,33	7850	946,2	0,794	5,060	5,050	0,347	26.312
Dwarsdrager 24 onderflens	3	5,060	0,220	0,028	48,36	7850	734,0	0,028	5,060	5,050	-0,064	20.289
Dwarsdrager 25a bovenflens	3	5,060	0,180	0,012	16,96	7850	257,4	0,012	5,060	1,350	0,874	1.215
Dwarsdrager 25a lijfplaat	3	5,060	0,010	0,400	31,40	7850	476,7	0,400	5,060	1,350	0,668	2.105
Dwarsdrager 25a onderflens	3	5,060	0,180	0,012	16,96	7850	257,4	0,012	5,060	1,350	0,462	1.073
Dwarsdrager 25b bovenflens	3	5,060	0,180	0,014	19,08	7850	289,6	0,014	5,060	1,350	0,448	1.204
Dwarsdrager 25b lijfplaat	3	5,060	0,009	0,373	25,18	7850	382,3	0,373	5,060	1,350	0,255	1.542
Dwarsdrager 25b onderflens	3	5,060	0,180	0,014	19,08	7850	289,6	0,014	5,060	1,350	0,062	1.147
Dwarsdrager 26a bovenflens	3	5,060	0,220	0,028	48,36	7850	734,0	0,028	5,060	0,500	0,736	2.147
Dwarsdrager 26a Lijfplaat	3	5,060	0,010	1,144	89,80	7850	1.363,2	1,144	5,060	0,500	0,150	3.429
Dwarsdrager 26a onderflens	3	5,060	0,220	0,028	48,36	7850	734,0	0,028	5,060	0,500	-0,436	1.889
Console achter 30 bovenflens	2	2,500	0,180	0,032	45,22	7850	226,1	0,032	2,500	3,100	0,756	2.420
Console achter 30 lijfplaat	2	2,500	0,010	0,920	72,22	7850	361,1	0,920	2,500	3,100	0,280	3.712
Console achter 30 onderflens	2	2,500	0,180	0,032	45,22	7850	226,1	0,032	2,500	3,100	-0,196	2.299
Hoekplaat 1 Bovenplaat	2	3,400	0,100	0,016	12,56	7850	85,4	0,016	3,400	13,550	0,872	15.828
Hoekplaat 1 lijfplaat	2	3,400	0,010	0,268	21,04	7850	143,1	0,268	3,400	13,550	0,730	26.481
Hoekplaat 1 onderplaat	2	3,400	0,100	0,016	12,56	7850	85,4	0,016	3,400	13,550	0,588	15.793
Hoekplaat 2 bovenplaat	2	3,400	0,100	0,016	12,56	7850	85,4	0,016	3,400	10,150	0,872	8.946
Hoekplaat 2 lijfplaat	2	3,400	0,010	0,268	21,04	7850	143,1	0,268	3,400	10,150	0,730	14.953
Hoekplaat 2 onderplaat	2	3,400	0,100	0,016	12,56	7850	85,4	0,016	3,400	10,150	0,588	8.911
Hoekplaat 3 bovenplaat	2	3,400	0,100	0,016	12,56	7850	85,4	0,016	3,400	6,750	0,872	4.039
Hoekplaat 3 Lijfplaat	2	3,400	0,010	0,268	21,04	7850	143,1	0,268	3,400	6,750	0,730	6.733
Hoekplaat 3 onderplaat	2	3,400	0,100	0,016	12,56	7850	85,4	0,016	3,400	6,750	0,588	4.003
Hoekplaat 4 bovenplaat	2	1,950	0,100	0,016	12,56	7850	49,0	0,016	1,950	4,075	0,872	866

Hoekplaat 4 Lijfplaat	2	1,950	0,010	0,268	21,04	7850	82,0	0,268	1,950	4,075	0,730	1.433
Hoekplaat 4 onderplaat	2	1,950	0,100	0,016	12,56	7850	49,0	0,016	1,950	4,075	0,588	846
Trogligger 1 onderplaat	18	13,900	0,170	0,008	10,68	7850	2.671,1	0,008	13,900	6,950	0,634	173104
Trogligger 1 zijplaten	34	13,900	0,008	0,230	14,44	7850	6.826,2	0,230	13,900	6,950	0,753	443.533
Trogligger 2 onderplaat	2	13,900	0,186	0,008	11,68	7850	324,7	0,008	13,900	6,950	0,630	21.042
Trogligger 2 zijplaten	4	13,900	0,008	0,234	14,70	7850	817,1	0,234	13,900	6,950	0,751	53.085
Hoofdligger 6 bovenflens	3	2,500	0,300	0,037	87,14	7850	653,5	0,037	2,500	-1,250	0,224	1.394
Hoofdligger 6 lijfplaat	3	2,500	0,012	0,926	87,23	7850	654,2	0,926	2,500	-1,250	-0,258	1.453
Hoofdligger 6 onderflens	3	2,500	0,300	0,037	87,14	7850	653,5	0,037	2,500	-1,250	-0,740	1.719
Hoofdligger 7 bovenplaat	3	1,000	0,030	0,037	8,71	7850	26,1	0,037	1,000	0,000	0,582	11
Hoofdligger 7 lijfplaat	3	1,000	0,012	1,126	106,07	7850	318,2	1,126	1,000	0,000	0,000	60
Hoofdligger 7 onderplaat	3	1,000	0,030	0,037	8,71	7850	26,1	0,037	1,000	0,000	-0,582	11
Hoofdligger 13 bovenplaat	3	2,500	0,350	0,038	104,41	7850	783,0	0,038	2,500	-1,250	0,223	1.670
Hoofdligger 13 lijfplaat	3	2,500	0,012	0,924	87,04	7850	652,8	0,924	2,500	-1,250	-0,258	1.450
Hoofdligger 13 onderplaat	3	2,500	0,350	0,038	104,41	7850	783,0	0,038	2,500	-1,250	-0,739	2.059
Hoofdligger 14 bovenplaat	3	1,000	0,350	0,038	104,41	7850	313,2	0,038	1,000	0,000	0,581	132
hoofdligger 14 lijfplaat	3	1,000	0,012	1,124	105,88	7850	317,6	1,124	1,000	0,000	0,000	60
Hoofdligger 14 onderplaat	3	1,000	0,350	0,038	104,41	7850	313,2	0,038	1,000	0,000	-0,581	132
Dwarsdrager 26b bovenplaat	3	5,060	0,220	0,028	48,36	7850	734,0	0,028	5,060	-0,500	0,456	1.902
Dwarsdrager 26b lijfplaat	3	5,060	0,010	1,144	89,80	7850	1.363,2	1,144	5,060	-0,500	0,000	3.398
Dwarsdrager 26b onderplaat	3	5,060	0,220	0,028	48,36	7850	734,0	0,028	5,060	-0,500	-0,716	2.126
Dwarsdrager 27 bovenrplaat	3	5,060	0,250	0,029	56,91	7850	863,9	0,029	5,060	-2,500	0,228	7.288
Dwarsdrager 27 lijfplaat	3	5,060	0,010	0,942	73,95	7850	1.122,5	0,942	5,060	-2,500	-0,258	9.568
Dwarsdrager 27 onderplaat	3	5,060	0,250	0,029	56,91	7850	863,9	0,029	5,060	-2,500	-0,744	7.721
Dwarsdrager 28 boven/onderplaat	3	5,060	0,250	0,029	56,91	7850	863,9	0,029	5,060	-3,750	0,228	14.037
Dwarsdrager 28 lijfplaat	3	5,060	0,010	0,942	73,95	7850	1.122,5	0,942	5,060	-3,750	-0,258	18.338
Dwarsdrager 28 boven/onderplaat	3	5,060	0,250	0,029	56,91	7850	863,9	0,029	5,060	-3,750	-0,744	14.470
Dwarsdrager 29 bovenplaat	3	5,060	0,250	0,029	56,91	7850	863,9	0,029	5,060	-5,000	0,228	23.486
Dwarsdrager 29 lijfplaat	3	5,060	0,010	0,942	73,95	7850	1.122,5	0,942	5,060	-5,000	-0,258	30.616
Dwarsdrager 29 onderplaat	3	5,060	0,250	0,029	56,91	7850	863,9	0,029	5,060	-5,000	-0,744	23.919
Ballastkist bovenplaat	3	5,060	2,500	0,016	314,00	7850	4.766,5	0,016	5,060	-3,750	0,234	77.460
Ballastkist onderplaat	3	5,060	2,500	0,016	314,00	7850	4.766,5	0,016	5,060	-3,750	-0,486	78.325
Ballastkist achterplaat	3	5,060	0,016	0,720	90,43	7850	1.372,8	0,720	5,060	-5,000	-0,118	37.326
Regelballast	1	8,920	0,196	0,785	861,62	5600	7.685,6	0,785	8,920	-5,103	-0,258	252.004
Slijtlaag (epoxy 8mm)	1	14,000	23,000	0,008	460,00	2500	6.440,0	0,008	14,000	8,350	0,876	559.142
Lasnaden	2%	14,000	23,000	1,000	99,51	-	2.289	1,000	14,000	8,350	0,380	197.480
Totaal							130.851	kg	120531			8.219.307

Benodigde ballast (geheel gebalanceerd)	openingshoek =	85		benodigde breedte =	11,711	m	< (2x5,06)+1x4,38 = 14,5m		
	werkarm X =	-3,75	(brug gesloten)			materiaal =	7.500	sg in kg/m3	
	werkarm Y =	-0,26	(brug gesloten)						
	ballast brug gesloten =	165.542		0,720	2,500	-3,750	-0,258		2.432.324
	werkarm X =								
	ballast brug geopend =	820.777		0,720	2,500	-3,750	-0,258		12.059.763
	gekozen ballast gewicht =	158.100		0,720	2,500	-3,750	-0,258		2.322.979
								Totaal (lp)	10.542.286

Momenten gebalanceerd	moment brug gesloten =		
	moment brug 90 ° geopend =	278	(neg = openend)
		-232	(neg = openend)
	moment brug bij openingshoek =	-206	(neg = openend)

Arm drp-oplegging	13,9	m
Vooroplegdruk: t.g.v. onbalans	20,0	kN
Totaal gewicht:	2.576	kN

In de evenwichtsberekening hierboven is de massa bepaald van het brugval. Deze bedraagt 130.851 kg. Hiervoor is een ballastgewicht gekozen van 131.780 kg om een vooroplegdruk te krijgen van 20 kN, ook wel het onbalans. Deze onbalans zorgt ervoor dat de brug goed kan worden opgelegd. De rest van het val is door het ballastgewicht gebalanceerd.

Evenwichtsberekening

Concept 2:

Totaal			0			116.138	kg	120531			7.934.693
Benodigde ballast (geheel gebalanceerd)	openingshoek =	3,86	85	graden				benodigde breedte =	12,326	m	< (2x5,06)= 10,12m
	werkarm X =	3,83	-3,83	m	(brug gesloten)			materiaal =	7.500	sg in kg/m3	
	werkarm Y =		-0,26	m	(brug gesloten)						
	ballast brug gesloten =		173.700	kg		0,720	2,500	-3,825	-0,258		2.650.878
	werkarm X =		-0,08	m	(brug geopend)						
	ballast brug geopend =		779.703	kg		0,720	2,500	-3,825	-0,258		11.899.215
	gekozen ballast gewicht =		166.400	kg		0,720	2,500	-3,825	-0,258		2.539.467
										Totaal (Ip)	10.474.161

Concept 2 maakt gebruik van twee ballastkisten. Hiervoor moet er in de evenwichtsberekening gekeken worden hoeveel breder deze ballastkisten dan moeten worden en wat er dan gedaan moet worden in de kelder. Omdat er bij dit concept maar twee ballastkisten zijn moeten alle onderdelen van de middelste ballastkist uit de evenwichtsberekening worden gehaald. Dit levert dan een totale brugvalgewicht op van 116.138 kg. Ook hier moet een ballastkistgewicht worden uitgekozen zodat er een vooroplegdruk overblijft van 20 kN. Het gekozen ballastgewicht is dan 166.400 kg. De benodigde breedte voor het ballastgewicht is dan ongeveer 10 meter. De huidige ballastkisten zijn 5 meter, voor concept 2 moeten de ballastkisten dus verbreedt worden met ongeveer 1 meter.

Evenwichtsberekening

Concept 3:

Benodigde ballast (geheel gebalanceerd)	openingshoek =	3,08	85	graden			benodigde breedte =	12,706	m	< (2x5,06)+1x4,38 = 14,5m
	werkarm X =	4,81	-4,80	m	(brug gesloten)		materiaal =	7.500	sg in kg/m3	
	werkarm Y =		-0,26	m	(brug gesloten)					
	ballast brug gesloten =		129.303	kg		0,720	1,800	-4,801	-0,258	3.029.481
	werkarm X =		-0,16	m	(brug geopend)					
	ballast brug geopend =		354.676	kg		0,720	1,800	-4,801	-0,258	8.309.837
	gekozen ballast gewicht =		123.500	kg		0,720	1,800	-4,801	-0,258	2.893.527
									Totaal (lp)	11.112.834

Concept 3 heeft drie ballastkisten waarvan twee 5,06 meter breed zijn en één 4,38 meter breed is. In totaal heeft de ballastkist dus een breedte van 14,5 meter beschikbaar.

Bijlage 6 - Berekeningen belastingen & krachten

Alle berekeningen van bijlage 9 komen van NEN 6786 2016 (VOBB); NEN. (2016). Bron: *NEN 6786 (nl)*. Nederlands Normalisatie-instituut.



Gegevens Berlagebrug:

Afmetingen;	$Lval := 13.9m$	Lengte van het val
	$Lstaart := 5m$	Lengte van de staart
	$Bval := 23m$	Breedte van het val
	$Aval := Lval \cdot Bval = 319.7m^2$	Oppervlakte van het val
	$Zas := 4.744m$	Zwaartepuntafstand van het val t.o.v. draaias
	$a_{dw} := 3.5m$	Afstand draaipunt tot gemiddelde waterstand
Eigengewicht;	$mval := 130851kg$	Gewicht van het val
	$mball := 158100kg$	Gewicht ballastkist
Luchtdichtheid;	$\rho := 1.25\frac{kg}{m^3}$	
Polair massatraagheid:	$I_{pv} := 1054228kg \cdot m^2$	Polair massatraagheidsmoment van het val t.o.v. draaias

Belastingen op het val (VOBB 2016):

- Stuwdruk

$vm := 13.5\frac{m}{s}$ De 10 min gemiddelde windsnelheid op 10m hoogte boven maaiveld

$Zo := 0.2m$ Ruwheidslengte volgens NEN-EN 1991-1-4

$Zvw := 10m$

$H_{Ze_i} := a_{dw} + Lval \cdot \sin\left(i \cdot deg + \operatorname{atan}\left(\frac{Zas}{Lval}\right)\right) - Zas$ Referentiehoogte t.o.v. waterstand (Lengte+NAP)

$$Ze_i := \begin{cases} 4 \cdot m & \text{if } H_{Ze_i} < 4 \cdot m \\ H_{Ze_i} & \text{if } H_{Ze_i} \geq 4 \cdot m \end{cases}$$ Voorwaarde van hoogte

$$Qp_i := 1.2\rho \cdot \left(vm \cdot \frac{\ln\left(\frac{Ze_i}{Zo}\right)}{\ln\left(\frac{Zvw}{Zo}\right)} \right)^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{7}{\ln\left(\frac{Ze_i}{Zo}\right)} \right) \right] = \ldots \frac{kN}{m^2}$$

$$\max(Qp) = 0.826 \frac{kN}{m^2}$$ Stuwdruk

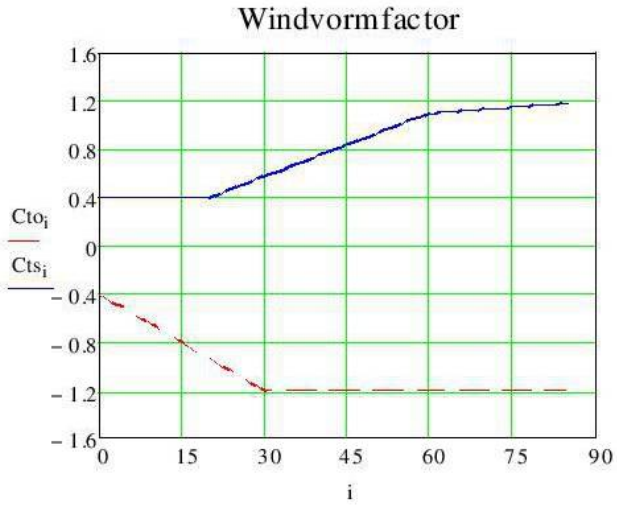
- Windbelasting

$Cs := 0.9$ Afmetingsfactor

$Cd := 1.1$ Dynamischefactor

$Smom := Aval \cdot (Zas) = 1517 m^3$ Statisch moment t.o.v. draaiingsas

Windvormfactor volgens grafiek:



<u>Windbelasting sluitend:</u>

$$Mw_{brug.s_i} := 1.05 Cs \cdot Cd \cdot Cts_i \cdot Qp_i \cdot Smon$$

$$\max(Mw_{brug.s}) = 1682 kN \cdot m$$

<u>Windbelasting openend:</u>

$$Mw_{brug.o_i} := 1.05 Cs \cdot Cd \cdot Cto_i \cdot Qp_i \cdot Smon$$

$$\min(Mw_{brug.o}) = -1724 kN \cdot m$$

Overige belastingen op de brug:

$Fval := (mval + mball) \cdot g = 2834\,kN$ Massa val

$Fonbelans := 20000N = 20\,kN$ Onbelans (overgewicht), uitgebalanseerd

Zwaartepuntafstanden t.o.v. draaiingsas;	Beoordeling	Score (0 t/m 5)
	$Zval_x := 6.95m$	x-afstand van het val
	$Zball_x := -4.375m$	x-afstand van de ballastkist
	$Zval_y := 0.550m$	y-afstand van het val
	$Zball_y := 0.378m$	y-afstand van de ballastkist

- Overgewicht:

$M_{o.gesloten_i} := Lval \cdot \cos(i \cdot deg) \cdot Fonbelans$

$M_{o.gesloten_0} = 278\,kN \cdot m$

- Variabel dekgewicht:

$\rho_{veg} := 50 \frac{N}{m^2}$

$Fveg := \rho_{veg} \cdot (Bval \cdot 0.75m) = 862.5N$ Het variabel dekgewicht wordt opgevangen door de aandrijving

$Mveg_i := \rho_{veg} \cdot Smomcos(i \cdot deg) = ...kN \cdot m$

$max(Mveg) = 76\,kN \cdot m$

- Wrijving

$\mu_r := 0.2$ Wrijvingsfactor staal/staal

$r_a := 0.16m$ Straal wrijvingsvlak van lagers

$Fr := \mu_r \cdot Fval = 708\,kN$ Wrijvingskracht

$M_{tapwr} := Fr \cdot r_a = 113\,kN \cdot m$ Wrijvingsmoment op de lagers

Bijlage 7 - Keuzematrix

Keuzematrix-1

Ingevuld door: [redacted]

		Beoordeling			Score (0 t/m 5)		
Selectiecriteria	Weging	Concept 1	Concept 2	Concept 3	Concept 1	Concept 2	Concept 3
Werking/efficiëntie	5	15	20	20	3	4	4
Betrouwbaarheid	4	12	16	16	3	4	4
Bereikbaarheid	4	16	20	12	4	5	3
Onderhoudsvriendelijk	3	3	12	12	1	4	4
Kelder behoud	4	20	8	16	5	2	4
Uitvoerbaarheid	3	9	12	15	3	4	5
Bouwtijd	5	15	10	20	3	2	4
Monumentale zorg	2	10	4	6	5	2	3
	Totaal:	**100**	**102**	**117**			

Keuzematrix-2

Ingevuld door: [redacted]

		Beoordeling			Score (0 t/m 5)		
Selectiecriteria	Weging	Concept 1	Concept 2	Concept 3	Concept 1	Concept 2	Concept 3
Werking/efficiëntie	5	15	20	25	3	4	5
Betrouwbaarheid	4	12	16	20	3	4	5
Bereikbaarheid	4	8	20	16	2	5	4
Onderhoudsvriendelijk	3	6	15	15	2	5	5
Kelder behoud	4	16	8	12	4	2	3
Uitvoerbaarheid	3	9	9	12	3	3	4
Bouwtijd	5	20	10	20	4	2	4
Monumentale zorg	2	10	6	8	5	3	4
	Totaal:	**96**	**104**	**128**			

Bijlage 8 - Tabel 11 VOBB 2016

Tabel 11 — Rekenwaarden van momenten op het brugbewegingsmechanisme, elektro-mechanisch aangedreven als functie van de belastingssituatie

Belastingssituatie	Belastingscombinatie	Rekenwaarden van momenten	Ψ_t	γ_w	$\gamma_{Q,Q,i}$
Overbelasten overbrenging	Vasthouden in elke stand	M_{Ed}	0,9	1,8	
	Begin openen vanuit gesloten stand	$M_{Ed} + \varepsilon M_{a,Ec} + 0,9 \sqrt{\{(\varepsilon M_{a,Ed})^2 + \gamma^2 \omega^2 C_1 J_2\}}$ ∨ $M_{Ed} + M_{max,Ed}$ [c]	0,7	1,8	Volgens tabel 7
	Aanvang versnellen/vertragen vanuit open of tussenstand [d f]	$\Phi_a \varepsilon (M_{Ed} + M_{a,Ed}) + \lvert 1 - \Phi_a \varepsilon \rvert M_{Ed}$ ∨ $M_{Ed} + M_{max,Ed}$	0,7	1,8	
	Stoppen van de brugbeweging via stopcategorie 0 [g]	$\Phi_a \varepsilon M_{br,Ed} + \lvert 1 - \Phi_a \cdot \varepsilon \rvert M_{Ed}$ ∨ $M_{Ed} + M_{max,Ed}$	0,7	1,8	
	Terugslag na remmen [g]	$M_{Ed} + \Phi_{br} \varepsilon (M_{Ed} + M_{br,Ed})$ ∨ $M_{Ed} + M_{max,Ed}$	0,7	1,8	
	Doorlopen van een verende buffer [d g]	$M_{Ed} + 0,4 M_{max,Ed}$	0,7	1,8	
	Aandrukken op opleggingen	$M_{fo,Ec}$	–	–	
Vermoeiing overbrenging	Eenparig bewegen	M_{Ed}	0,25	1,2	1,0
	Begin openen vanuit gesloten stand	$M_{Ed} + \varepsilon M_{a,Ed} + 0,9 \sqrt{\{(\varepsilon M_{a,Ed})^2 + \omega^2 C_1 J_2\}}$ ∨ $M_{Ec} + M_{max,Ed}$	0,25	1,2	1,0
	Aanvang versnellen/vertragen in open stand [a]	$\Phi_a \varepsilon (M_{Ed} + M_{a,Ed}) + \lvert 1 - \Phi_a \varepsilon \rvert M_{Ed}$ ∨ $M_{Ec} + M_{max,Ed}$	0,25	1,2	1,0
	Invallen van remkoppel [b r]	$\Phi_a \varepsilon M_{br,Ec} + \lvert 1 - \Phi_a \varepsilon \rvert M_{Ed}$ ∨ $M_{Ed} + M_{max,Ed}$	0,25	1,2	1,0
	Terugslag na remmen [s h]	$M_{Ed} + \Phi_{br} \varepsilon (M_{Ed} + M_{br,Ed})$ ∨ $M_{Ed} + M_{max,Ec}$	0,25	1,2	1,0
	Aandrukken op opleggingen	$M_{fo,Ec}$	–	–	1,0
Maximum grens-motorkoppel [e]	Eenparig bewegen	M_{Ed}	0,8	1,1	1,1
	Versnellen/vertragen [f]	$M_{Ed} + \Phi_a M_{a,Ed}$	0,7	1,1	1,1
	Aandrukken op opleggingen	$M_{fo,Ec}$	–	–	1,1
Maximum toegekend motorkoppel [e]	Eenparig bewegen	M_{Ed}	0,5	1,1	1,1
	Versnellen/vertragen	$M_{Ed} + M_{a,Ed}$	0,5	1,1	1,1
Maximum remkoppel [e]	Vertragen (rem wordt gebruikt als vertragingsrem)	$M_{Ed} + M_{a,Ed}$	0,7	1,1	1,1
	Vasthouden (rem wordt gebruikt als vasthoudrem)	M_{Ed}	0,9	1,1	1,1

[a] De absoluut strepen gelden niet bij toepassing van een motor met een geregelde snelheid.
[b] Indien de rem invalt nadat de brug tot stilstand is gekomen, is deze belastingscombinatie niet van toepassing.
[c] $\gamma = 1,3$
[d] De waarde van 0,4 geldt bij toepassing van schotelveren; voor ander type veren gelden andere waarden.
[e] Bij deze belastingscombinaties is $\beta = 0,5$ voor de windbelasting.
[f] Geldt ook voor het stoppen van de brugbeweging via stopcategorie 1 zie 2.3.9.
[g] Bij deze belastingscombinatie moet zijn gerekend met het stoppen van de brugbeweging via stopcategorie 0 waarbij de (mechanische) vertragingsrem invalt: zie 2.3.9.
[h] Voor niet geregelde aandrijvingen moet bij deze belastingscombinatie zijn gerekend met het stoppen van de brugbeweging via stopcategorie 0 waarbij de vasthoudrem invalt; zie 2.3.9.

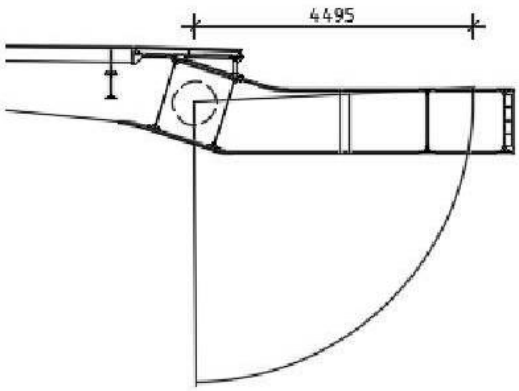
Vervangt EBI 0766 bedoeld voor de vrijgave voor de Vesp alleen commissiewerkzaamheden.

Bijlage 9 - Berekeningen bewegingswerk

Alle berekeningen van bijlage 9 komen van NEN 6786 2016 (VOBB); NEN. (2016). Bron: *NEN 6786 (nl)*. Nederlands Normalisatie-instituut.

Berekening overbrengingsverhouding

van concept 3



gegevens:

$dt := 60s$

$n_{motor} := 1500$ (rpm)

$r := 4500mm$

$d\theta := 85deg = 1.484rad$

Snelheid het val (staart):

$$\omega_{val} := \frac{d\theta}{dt} = 0.025\frac{rad}{s}$$

$$v_{val} := \omega_{val} \cdot r$$

Snelheid motor:

$$\omega_{motor} := \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{motor}}{60s} = 157\frac{rad}{s}$$

Totale overbrenging:

$$i_{tot} := \frac{\omega_{motor}}{\omega_{val}} = 6352.9$$

Berekeningen belastingssituaties

- **Krachten en momenten op mechanische uitrusting (VOBB 2016)**

Tabel 11 - momenten herleid naar motoras

Algemene gegevens:

$i_{tot} := 635$

$\omega := 157.1 \frac{rad}{s}$ Hoekversnelling motoras

Massatraagheid herleiden naar motoras:

$i_t := \frac{1}{i_{tot}}$ Totale overbrengingsverhouding naar motoras

$I_{2_i} := (i_t)^2 \cdot I_{pv} = \ldots$ $I_1 := 1.5 kg \cdot m^2$

$\varepsilon_{m_i} := \frac{1.2 I_{2_i}}{I_1 + 1.2 I_{2_i}}$ Massafactor

$\varepsilon_{m_i} := 0.8$ Voor de berekening van de (uitgaande motoras) geldt ε =0.8

Maximale waarde van het moment op de motoras:

$\gamma_{max} := 1.3$

$C_1 := 100 \frac{N \cdot m}{rad}$ Stijfheid herleid naar motoras

$Ma_{max} := 0.9 \gamma_{max} \sqrt{(\omega^2 \cdot C_1 \cdot I_2)}$ $\max(Ma_{max}) = 965 N \cdot m$

- **Belastingssituaties en belastingscombinatie:**

Overbelasten overbrenging

Vasthouden in elke stand

Duurfactor wind: $\psi_t := 0.9$

Belastingsfactor wind: $\gamma_w := 1.8$

Belastingsfactor overige belastingen: $\gamma_{gk} := 1.2$

$\psi_0 := 1.0$ $\psi_{0i} := 1.0$ $\eta := 1$

Representatieve waarde van moment op de motoras door het eigengewicht/variabel dekgewicht:

$M_{gk.s_i} := \left(Mveg_i + M_{o.gesloten_i} + M_{tapwr}\right)$ $\max\left(M_{gk.s}\right) = 370\,kN{\cdot}m$

$M_{gk.o_i} := \left[(-Mveg)_i + M_{o.gesloten_i} + M_{tapwr}\right]$ $\max\left(M_{gk.o}\right) = 219\,kN{\cdot}m$

Statisch moment op de motoras om de brug in de meest ongunstige richting te bewegen/vast te houden:

Wind sluitend:

$$M_{Ed1_i} := \frac{\left(\left|\gamma_w \cdot \psi_t \cdot \psi_0 \cdot Mw_{brug.s_i} + \gamma_{gk} \cdot \psi_{0i} \cdot M_{gk.s_i}\right|\right) \cdot i_t}{\eta} = ..:kN{\cdot}m$$ $\max\left(M_{Ed1}\right) = 448\,N{\cdot}m$

wind openend:

$$M_{Ed2_i} := \frac{\left(\left|\gamma_w \cdot \psi_t \cdot \psi_0 \cdot Mw_{brug.o_i} + \gamma_{gk} \cdot \psi_{0i} \cdot M_{gk.o_i}\right|\right)}{\eta} \cdot i_t = ..:kN{\cdot}m$$ $\max\left(M_{Ed2}\right) = 427\,N{\cdot}m$

$M_{as1} := \max\left(M_{Ed1}, M_{Ed2}\right)$ $M_{as1} = 448\,N{\cdot}m$

Begin openen vanuit gesloten stand

Duurfactor wind: $\psi_{ww} := 0.7$

Belastingsfactor wind: $\gamma_{ww} := 1.8$

Belastingsfactor overige belastingen: $\gamma_{gk} := 1.2$ $\eta := 0.95$

wind sluitend:

$$M_{Ed_i} := \frac{\left(\left|\gamma_w \cdot \psi_t \cdot \psi_0 \cdot Mw_{brug.s_i} + \gamma_{gk} \cdot \psi_{0i} \cdot M_{gk.s_i}\right|\right) \cdot i_t}{\eta} = ..:kN{\cdot}m$$ $\min\left(M_{Ed}\right) = 170\,N{\cdot}m$

Rekenwaarde van het moment op de motoras (met geregelde snelheid) door versnellen, vertragen of remmen:

$\gamma_a := 1.$ $\quad \Delta\omega := 157.1\frac{rad}{s}$ $\quad \Delta t := 60s$

$$Ma_{Ed_i} := \gamma_a \cdot \left(I_1 + \frac{I_{2_i}}{\eta}\right) \cdot \left(\frac{\Delta\omega}{\Delta t}\right)$$

$$M_{as2_i} := M_{Ed_i} + \varepsilon_{m_i} \cdot Ma_{Ed_i} + \left[0.9\sqrt{\left[\left(\varepsilon_{m_i} \cdot Ma_{Ed_i}\right)^2 + \gamma_{max}^2 \cdot \omega^2 \cdot C_1 \cdot I_{2_i}\right]}\right] \cdot i_t = \ldots$$

$$M_{as2} := M_{Ed_0} + \varepsilon_{m_0} \cdot Ma_{Ed_0} + \left[0.9\sqrt{\left[\left(\varepsilon_{m_0} \cdot Ma_{Ed_0}\right)^2 + \gamma_{max}^2 \cdot \omega^2 \cdot C_1 \cdot I_{2_0}\right]}\right] \cdot i_t$$

$M_{as2} = 175\,N \cdot m$

<u>Aanvang versnellen/vertragen vanuit open of tussenstand:</u>

$\phi_a := 1.$ $\quad \phi_{br} := 0.$

wind sluitend:

$$M_{Ed_i} := \frac{\left(\left|\gamma_w \cdot \psi_t \cdot \psi_0 \cdot Mw_{brug.s_i} + \gamma_{gk} \cdot \psi_{0i} \cdot M_{gk.s_i}\right|\right) \cdot i_t}{\eta} = \ldots\,kN \cdot m$$

$$Mas_{1_i} := \phi_a \cdot \varepsilon_{m_i} \cdot \left(M_{Ed_i} + Ma_{Ed_i}\right) + \left(1 - \phi_a \cdot \varepsilon_{m_i}\right) \cdot M_{Ed_i} = \ldots\,kN \cdot m$$

wind openend:

$\max\left(Mas_1\right) = 385\,N \cdot m$

$$M_{Ed_i} := \frac{\left(\left|\gamma_w \cdot \psi_t \cdot \psi_0 \cdot Mw_{brug.o_i} + \gamma_{gk} \cdot \psi_{0i} \cdot M_{gk.o_i}\right|\right) \cdot i_t}{\eta} = \ldots\,kN \cdot m$$

$$Mas_{2_i} := \phi_a \cdot \varepsilon_{m_i} \cdot \left(M_{Ed_i} + Ma_{Ed_i}\right) + \left(1 - \phi_a \cdot \varepsilon_{m_i}\right) \cdot M_{Ed_i} = \ldots\,kN \cdot m$$

$\max\left(Mas_2\right) = 357\,N \cdot m$

$M_{as3} := \max\left(Mas_1, Mas_2\right) = 385\,N \cdot m$

Stoppen van de brugbeweging via stopcategorie 0:

Remkoppel herleid naar motoras:

$\gamma_{br} := 1.1$ $\gamma_{rem} := 1.2$ $\eta := 1$ $\psi_t := 0.7$

wind sluitend:

$$M_{Ed_i} := \frac{\left(\left|\gamma_w \cdot \psi_t \cdot \psi_0 \cdot Mw_{brug.s_i} + \gamma_{gk} \cdot \psi_{0i} \cdot M_{gk.s_i}\right|\right) \cdot i_t}{\eta} = \ldots kN \cdot m$$

$Mbr_{instel} := \gamma_{rem} \cdot 210N \cdot m = 252N \cdot m$ ingestelde remkoppel van klaprozenweg

$Mbr := Mbr_{instel} \cdot \gamma_{br} \cdot \gamma_{rem} = 347.76N \cdot m$

$$Mas_{1_i} := \phi_a \cdot \varepsilon_{m_i} \cdot Mbr + \left|1 - \phi_a \cdot \varepsilon_{m_i}\right| \cdot M_{Ed_i} \qquad \max(Mas_1) = 714N \cdot m$$

wind openend:

$$M_{Ed_i} := \frac{\left(\left|\gamma_w \cdot \psi_t \cdot \psi_0 \cdot Mw_{brug.o_i} + \gamma_{gk} \cdot \psi_{0i} \cdot M_{gk.o_i}\right|\right) \cdot i_t}{\eta} = \ldots kN \cdot m$$

$$Mas_{2_i} := \phi_a \cdot \varepsilon_{m_i} \cdot Mbr + \left|1 - \phi_a \cdot \varepsilon_{m_i}\right| \cdot M_{Ed_i} \qquad \max(Mas_2) = 700N \cdot m$$

$M_{as4} := \max(Mas_1, Mas_2)$ $M_{as4} = 714N \cdot m$

Terugslag na remmen:

wind sluitend:

$$M_{Ed_i} := \frac{\left(\left|\gamma_w \cdot \psi_t \cdot \psi_0 \cdot Mw_{brug.s_i} + \gamma_{gk} \cdot \psi_{0i} \cdot M_{gk.s_i}\right|\right) \cdot i_t}{\eta} = \ldots kN \cdot m$$

$$Mas_{1_i} := M_{Ed_i} + \phi_{br} \cdot \varepsilon_{m_i} \cdot \left(M_{Ed_i} + Mbr\right) = \ldots$$

$Mas1 := \max(Mas_1) = 865N \cdot m$

wind openend:

$$M_{Ed_i} := \frac{\left(\left|\gamma_w \cdot \psi_t \cdot \psi_0 \cdot Mw_{brug.o_i} + \gamma_{gk} \cdot \psi_{0i} \cdot M_{gk.o_i}\right|\right) \cdot i_t}{\eta} = \ldots kN \cdot m$$

$Mas_{2_i} := M_{Ed_i} + \phi_{br} \cdot \varepsilon_{m_i} \cdot \left(M_{Ed_i} + Mbr\right) = \ldots$ $Mas2 := \max(Mas_2) = 819N \cdot m$

$M_{as5} := \max(Mas1, Mas2) = 865N \cdot m$

Doorlopen van een verende buffer:

wind sluitend:

$$M_{Ed_i} := \frac{\left(\left|\gamma_w \cdot \psi_t \cdot \psi_0 \cdot Mw_{brug.s_i} + \gamma_{gk} \cdot \psi_{0i} \cdot M_{gk.s_i}\right|\right) \cdot i_t}{\eta} = \ldots kN \cdot m$$

$Mas1 := M_{Ed} + 0.4Ma_{max}$

wind openend:

$$M_{Ed_i} := \frac{\left(\left|\gamma_w \cdot \psi_t \cdot \psi_0 \cdot Mw_{brug.o_i} + \gamma_{gk} \cdot \psi_{0i} \cdot M_{gk.o_i}\right|\right) \cdot i_t}{\eta} = \ldots kN \cdot m$$

$Mas2 := M_{Ed} + 0.4Ma_{max}$

$M_{as6} := \max(Mas1, Mas2)$ $\quad M_{as6} = 743 N \cdot m$

Maximum grensmotorkoppel

$\psi_0 := 1.0$ $\quad \gamma_w := 1.1$ $\quad \gamma_{gk} := 1.1$

Eenparig bewegen:

$\psi_t := 0.8$

wind sluitend:

$$M_{Ed1_i} := \frac{\left(\left|\gamma_w \cdot \psi_t \cdot \psi_0 \cdot Mw_{brug.s_i} + \gamma_{gk} \cdot \psi_{0i} \cdot M_{gk.s_i}\right|\right)}{\eta} \cdot i_t = \ldots kN \cdot m$$

wind openend:

$$M_{Ed2_i} := \frac{\left(\left|\gamma_w \cdot \psi_t \cdot \psi_0 \cdot Mw_{brug.o_i} + \gamma_{gk} \cdot \psi_{0i} \cdot M_{gk.o_i}\right|\right)}{\eta} \cdot i_t = \ldots kN \cdot m$$

$M_{as8} := \max(M_{Ed1}, M_{Ed2})$ $\quad M_{as8} = 251 N \cdot m$

Versnellen / vertragen:

$\psi_t := 0.7$ $\quad \gamma_w := 1.1$

$$M_{Ed_i} := \frac{\left(\left|\gamma_w \cdot \psi_t \cdot \psi_0 \cdot Mw_{brug.s_i} + \gamma_{gk} \cdot \psi_{0i} \cdot M_{gk.s_i}\right|\right)}{\eta} \cdot i_t = \ldots kN \cdot m$$

$$Ma_{Ed1_i} := \gamma_a \cdot \left(I_1 + \frac{I_{2_i}}{\eta}\right) \cdot \left(\frac{\Delta\omega}{\Delta t}\right) \qquad M_{as9_i} := M_{Ed_i} + \phi_a \cdot Ma_{Ed1_i}$$

$M_{as9} := \max(M_{as9}) = 234 N \cdot m$

- **Maximum toegekend motorkoppel**

$\psi_t := 0.$ $\gamma_w = 1.1$ $\gamma_{gk} = 1.1$ $\Psi_0 = 1$

Eenparig bewegen:

Wind sluitend

$$M_{Ed1_i} := \frac{\left(\left|\gamma_w \cdot \psi_t \cdot \psi_0 \cdot Mw_{brug.s_i} + \gamma_{gk} \cdot \psi_{0i} \cdot M_{gk.s_i}\right|\right) \cdot i_t}{\eta} = ...\,kN \cdot m$$

Wind openend

$$M_{Ed2_i} := \frac{\left(\left|\gamma_w \cdot \psi_t \cdot \psi_0 \cdot Mw_{brug.o_i} + \gamma_{gk} \cdot \psi_{0i} \cdot M_{gk.o_i}\right|\right) \cdot i_t}{\eta} = ...\,kN \cdot m$$

$M_{as10} := \max(M_{Ed1}, M_{Ed2})$ $M_{as10} = 169\,N \cdot m$

Versnellen / vertragen:

$\gamma_a = 1.1$

$$Ma_{Ed_i} := \gamma_a \cdot \left(I_1 + \frac{I_{2_i}}{\eta}\right) \cdot \left(\frac{\Delta\omega}{\Delta t}\right)$$

Wind sluitend

$M_{1_i} := M_{Ed1_i} + Ma_{Ed_i}$

Wind openend

$M_{2_i} := M_{Ed2_i} + Ma_{Ed_i}$ $M_{as11} := \max(M_1, M_2) = 175\,N \cdot m$

- **Maximum remkoppel**

Vertragen (rem als vertragingsrem):

$\psi_t := 0.$ $\gamma_w = 1.1$ $\gamma_{gk} = 1.1$

Wind sluitend

$$M_{Ed1_i} := \frac{\left(\left|\gamma_w \cdot \psi_t \cdot \psi_0 \cdot Mw_{brug.s_i} + \gamma_{gk} \cdot \psi_{0i} \cdot M_{gk.s_i}\right|\right) \cdot i_t}{\eta} = ...\,kN \cdot m$$

$M_{1_i} := M_{Ed1_i} + Ma_{Ed_i}$

Wind openend

$$M_{Ed2_i} := \frac{\left(\left|\gamma_w \cdot \psi_t \cdot \psi_0 \cdot Mw_{brug.o_i} + \gamma_{gk} \cdot \psi_{0i} \cdot M_{gk.o_i}\right|\right) \cdot i_t}{\eta} = \ldots kN \cdot m$$

$$M_{2_i} := M_{Ed2_i} + Ma_{Ed_i}$$

$$M_{as12} := \max(M_1, M_2)$$

$M_{as12} = 229\,N \cdot m$

Vasthouden (rem als vasthoudrem)

$\psi_t := 0.9$

Wind sluitend

$$M_{Ed1_i} := \frac{\left(\left|\gamma_w \cdot \psi_t \cdot \psi_0 \cdot Mw_{brug.s_i} + \gamma_{gk} \cdot \psi_{0i} \cdot M_{gk.s_i}\right|\right) \cdot i_t}{\eta} = \ldots kN \cdot m$$

$$M_{1_i} := M_{Ed1_i} + Ma_{Ed_i}$$

Wind openend

$$M_{Ed2_i} := \frac{\left(\left|\gamma_w \cdot \psi_t \cdot \psi_0 \cdot Mw_{brug.o_i} + \gamma_{gk} \cdot \psi_{0i} \cdot M_{gk.o_i}\right|\right) \cdot i_t}{\eta} = \ldots kN \cdot m$$

$$M_{as13} := \max(M_{Ed1}, M_{Ed2})$$

$M_{as13} = 278\,N \cdot m$

Maatgevende koppels

$n := 2$

Maximum toegekend motorkoppel:

Eenparig bewegen $M_{as10} = 169\,N \cdot m$

Versnellen / vertragen $M_{as11} = 175\,N \cdot m$

Nominaal koppel: $M_{nom1} := \max(M_{as10}, M_{as11})$

Overbelasten overbrenging:

$M_{as.o1} := \max(M_{as1}, M_{as2}, M_{as3}, M_{as4}, M_{as5})$ Motoras

$M_{as.o1} = 865\,N \cdot m$

$i_1 := 12.5$

$M_{max.o2} := i_1 \cdot M_{as.o1} = 10809\,N \cdot m$ Ingaande as tandwielkast

Begin openen vanuit gesloten stand $M_{as.2} := \frac{2}{3} \cdot 2 \cdot M_{as2} = 233\,N \cdot m$

Aanvang versnellen/vertragen vanuit open stand $M_{as.3} := \frac{2}{3} \cdot 2 \cdot M_{as3} = 514\,N \cdot m$

$i_2 := 20.7$

$M_{max.o.3} := i_1 \cdot i_2 \cdot \max\left(M_{as.o1}, M_{as.2}, M_{as.3}\right) \cdot \frac{1}{2} = 112\,kN \cdot m$ Uitgaande rondselas

Motor:

Maatgevend = Maximum toegekend motorkoppel:

$M_{nom1} = 175\,N \cdot m$

Bedrijfsfactor: $b := 0.8$

$P_m := M_{nom1} \cdot \omega \cdot b \qquad P_m = 21.9\,kW$

Kies: $P_m := 30kW$

$M_{nom} := \frac{P_m}{\omega} \qquad M_{nom} = 191 \cdot N \cdot m$

Motor gegevens:

Type: draaistroom kortsluit motor (DRE 200L4)
P: 30 kW x 1500 t/min
T_{nom}: 194 Nm
Uitgaande as: rond 55

Overschrijden grensmotorkoppel:

$M_{as.g} := \max\left(M_{as8}, M_{as9}\right)$

$M_{as.g} = 251 \cdot N \cdot m$

$M_{kip} >= \frac{M_{as.g}}{M_{nom}} = 1.3 \quad \times M_{nom} \qquad M_{kip} := 1.9 M_{nom} = 363\,N \cdot m$

Rem:

Maximum remkoppel:

Vertragen (rem als vertragingsrem) $M_{as12} = 229\,N\cdot m$

Vasthouden (rem als vasthoudrem) $M_{as13} = 278\,N\cdot m$

Tandwielkast 1:

Voor splitsing aandrijving in twee (motor-tandwielkast)
Overbrengingen:

Nominaal koppel: $M_{nom2} := M_{nom1}\cdot i_1$ $M_{nom2} = 2.18\,kN\cdot m$

Maximale koppel: $M_{max.o.2} = 10.81\,kN\cdot m$

Overbelasten: $\gamma_o := 1.5$ $\gamma_{ro} := 0.9$

$M_{N2.O} := \gamma_{ro}\cdot\frac{M_{max.o.2}}{\gamma_o}$ $M_{N2.O} = 6.49\,kN\cdot m$

type : SEW - X2F110, i = 12.5, 2-traps
bouwvorm : evenwijdige assen
n2 : 118 rpm
M_{N2} : 8.50 kNm (8.50 kNm)

Tandwielkast 2:

Voor rondsel - panamawiel

Nominaal koppel: $M_{nom3} := M_{nom2}\cdot i_2$ $M_{nom3} = 45\,kN\cdot m$

Maximale koppel: $M_{max.o.3} = 112.04\,kN\cdot m$

Overbelasten: $\gamma_o := 1.5$ $\gamma_{ro} := 0.9$

$M_{N2.O} := \gamma_{ro}\cdot\frac{M_{max.o.3}}{\gamma_o}$ $M_{N2.O} = 67.22\,kN\cdot m$

type : SEW - X3F200, i = 20.73, 3-traps
bouwvorm : evenwijdige assen
n2 : 48 rpm
M_{N2} : 77.6 kNm (79 kNm)

Panamawiel overbrenging:

Rondsel - Panamawiel = $i_3 := 1($

Rondsel: $Z_2 := 1$ $M_n := 20mn$ $d_2 := Z_2 \cdot M_n = 280\,mn$

Krukwiel: $Z_3 := 140$ $d_3 := Z_3 \cdot M_n = 2800\,mn$

Kruk-drijfstang = $i_4 := 0.4^{-1}$ Gemiddelde van Panamawiel klaprozenweg

Breedte rondsel: $b_{t1} := 0.95 d_2 = 266\,mn$

Kies: $b_{t1} := 265mn$

Breedte panamawiel: $b_{t2} := b_{t1} - 5mm = 260\,mn$

Factoren voor bepalen representatieve waarden:

$\gamma_{o.d} := 1.6$

Koppel rondselas: $M_{t.o.d} := M_{max.o.}$ $M_{t.o.d} = 112\,kNm$ Overbelasten overbrenging

Omtrek tandkracht: $F_{t.O.rep} := \frac{M_{t.o.d}}{0.5 \gamma_{o.d} \cdot d_2}$ $F_{t.O.rep} = 485\,kN$ Overbelasten overbrenging

Hoeksnelheid rondsel: $\omega_2 := \frac{\omega}{i_1 \cdot i_2 \cdot i_3} = 0.061 \frac{rad}{s}$

Hoeksnelheid kruktandwiel: $\omega_3 := \frac{\omega}{i_1 \cdot i_2 \cdot i_3 \cdot i_4} = 0.024 \frac{rad}{s}$