

Pijlerbouw in rivieren

Een brug te ver voor de Genie?

Bachelor eindopdracht ter afsluiting van de studie Civiele Techniek aan de
Nederlandse Defensie Academie te Breda

W. Versteeg

Cadet-Vaandrig van het Wapen der Genie

D-cie Cadettenbataljon

Interne begeleider: Prof. Dr. ir. Ing. A.E.C. van der Stoel Hoogleraar Faculteit
Militaire Wetenschappen Sectie Civiele Techniek

Externe begeleiders: Lkol. A.B.G.J. Linsen Commandant Geniewerken
Kap. S. Meijer Bureau Geniewerken, Vakgroep GWW

Breda, 27 maart 2008

Voorwoord

Om de studie Civiele Techniek aan de NLDA te kunnen af ronden heb ik het voorrecht om een onderzoek uit te voeren in de vorm van een bachelor eindopdracht. De laatste hindernis voor het behalen van de bachelor titel. Gedurende de opleiding civiele techniek wekte waterbouwkunde al meerdere keren mijn interesse en ik was daarom ook enthousiast toen ik met het onderwerp brugpijlers aan de slag kon gaan. De kennis die ik in de drie jaar durende studie heb opgedaan moest soms van ver komen maar heeft uiteindelijk kunnen leiden tot het eindproduct dat u nu voor u heeft.

Dit eindproduct had zich niet als zodanig kunnen ontwikkelen zonder de begeleiding van Prof. van der Stoel en Ikol Linsen. Beide hebben er voor gezorgd dat ik zocht in de juiste hoeken en dat de gevonden informatie ook op een gedegen en onderbouwde manier werden verwerkt in het uiteindelijke verslag. Bij deze wil ik hen van harte bedanken voor de tijd en energie die zij in mij en mijn bachelor eindopdracht hebben gestoken ondanks de reeds volle agenda van beide heren.

Voor de opstart van het onderzoek gaat mijn dank uit naar kap b.d. Meijer die mij begeleid heeft tijdens het schrijven van mijn onderzoeksvorstel en de eerste handvatten tijdens de aan het onderzoek voorafgaande literatuurstudie.

Met betrekking tot de informatie verschaffing gaat mijn dank verder uit naar de 'Machinisten school' van het 'Opleidings en trainingscentrum Genie' waar een bron van praktische ervaring mij voorzag van de juiste informatie. Verder heeft de sectie Civiele Techniek aan de Universiteit Twente mij van de nodige pillen met vaak een overload aan informatie voorzien waar door het een hele klus was om de juiste informatie op de juiste manier op papier te krijgen.

Steun op een heel ander vlak heb ik gekregen van mijn collega's die met dezelfde hindernis aan het stoeien waren. Ik wil hen bedanken voor de samenwerking met betrekking tot het op een hoog niveau houden van de scherpte en de nodige koffie die ik met hen genuttigd heb.

Rest mij nog u veel plezier te wensen bij het lezen van dit rapport.

Inhoudsopgave

VOORWOORD	2
INHOUDSOPGAVE	3
SAMENVATTING	4
1 INLEIDING	6
1.1 AANLEIDING TOT DEZE STUDIE	6
1.2 OPZET EINDSTUDIE.....	7
2 FACTOREN VAN INVLOED	8
2.1 INLEIDING	8
2.2 STUWKRACHT (WATER EN/OF IJS)	9
2.3 WINDKRACHT	13
2.4 SEDIMENT TRANSPORT	15
2.6 TEMPERATUUR VERSCHILLEN.....	19
2.7 BOTSINGEN	21
2.8 AARDBEVINGEN	24
2.9 OPDRIJVENDE KRACHTEN	26
3 BOUWMETHODES	28
3.1 GENIETECHNIEKEN	28
3.2 CIVIELE TECHNIEKEN.....	31
3.3 CONCLUSIE.....	37
4 CASE STUDY	39
4.1 TIRIN RIVIER	39
4.2 TALIBAN BRIDGE	42
4.3 MECHANICA MODEL.....	44
4.4 UITWERKING CASE STUDY	47
4.5 CONCLUSIE.....	64
5 CONCLUSIES & AANBEVELINGEN	66
5.1 BOUWMETHODES.....	66
5.2 CASE STUDY.....	68
6 LITERATUURLIJST	71
5.1 GERAADPLEEGDE MILITAIRE PUBLICATIES EN INSTANTIES:.....	72
5.2 INTERNETBRONNEN.....	72
BIJLAGE 1: WAPENINGSTABEL	73
BIJLAGE 2: BEREKENINGEN STUWKRACHT	74
BIJLAGE 3: BEREKENINGEN CAPACITEIT PIJLER	76
BIJLAGE 4: BEREKENINGEN WINDKRACHT	78
BIJLAGE 5: GRAFIEK KOLOMWAPENING	80

Samenvatting

De Tirin rivier in Afghanistan beperkt de daar optredende eenheden sterk in hun bewegingsvrijheid. De brug die ooit de rivier overspande is in dusdanig vervallen staat dat deze brug nauwelijks nog gebruikt kan worden. Dit heeft er toe geleid dat de Nederlandse eenheden in Afghanistan de opdracht hebben gekregen van de commandant TFU (Task Force Uruzgan) om deze brug te herstellen of indien nodig een nieuwe brug te bouwen.

Mede hierdoor is er een behoefte ontstaan aan kennis over de factoren die van invloed zijn op de stabiliteit van pijlers in ondiep stromend water. Op deze manier kan er vervolgens beschouwd worden met welke militair beschikbare bouwmethode er pijlers in ondiep stromend water gebouwd kunnen worden in het algemeen en voor de Tirin rivier in het bijzonder.

Tijdens de eerste analyse kwamen de volgende factoren naar voren:

- Stuwkracht (water en/of ijs)
- Windkracht
- Erosie (door sediment transport)
- Temperatuur verschillen
- Botsingen
- Aardbevingen
- Opdrijvende krachten

Vervolgens is er een inventarisatie gemaakt van de verschillende bouwmethodes die militair dan wel civiel bekend zijn. Hierbij kwam naar voren dat de genie over de kennis en de materialen beschikt om brugpijlers te bouwen. Het knelpunt zit echter in de fundering van een brugpijler. Binnen de genie werd er nagenoeg alleen gewerkt met een fundering op staal. Deze manier van funderen kan echter niet gebruikt worden wanneer een pijler in een rivier gefundeerd dient te worden. Kennis over paalfunderingen is aanwezig maar wordt al jaren niet meer gebruikt.

Met betrekking tot de civiel gebruikte bouwmethodes bleken er een aantal bouwmethoden naar voren te komen. Met name de damwandkuip en de paalfundering bleken mogelijkheden te bieden voor gebruik binnen de genie. Wel dient bij beide methodes de kennis met betrekking tot grondmechanica aanwezig te zijn in verband met de complexe situaties die ontstaan bij het gebruik van deze methodes.

Het gebruik van paalfunderingen geniet de voorkeur in verband met de al aanwezige kennis en de brede toepasbaarheid. De damwandkuip daarentegen is eenvoudiger in het gebruik maar mede daardoor ook minder breed toepasbaar. Verder bleek de puttenfundering een goede manier van funderen. Het construeren van deze fundering brengt wel moeilijkheden met zich mee voornamelijk met betrekking tot het aanwezige water. De caissonfundering bleek te complex om binnen de genie mee te werken. De specialistische kennis en materieel die nodig is om deze bouwmethode tot een succes te maken zijn van een dusdanig niveau dat het voor defensie moeilijk haalbaar is. Het aanpassen van het waterpeil is een andere oplossing die naar voren kwam. Deze methode kan echter alleen toegepast worden bij kleinschalige projecten.

De aanbeveling met betrekking tot de bouwmethodes is dan ook om zowel paalfunderingen als de damwandkuip nader te onderzoeken op toepasbaarheid en de mogelijke complicaties bij implementatie in kaart te kunnen brengen. Verder dient het een aanbeveling om het gebruik van puttenfundering te onderzoeken.

Als laatste is er een case study uitgevoerd om de gevolgen van de onderkende invloedsfactoren in kaart te brengen. Stuwkracht bleek het grootste risico voor een brugpijler. Wanneer de hoogte van het waterpeil maar vooral de snelheid van het water toeneemt, zorgt dit voor een grote horizontale kracht. Verder is sediment transport een ingewikkeld fenomeen waardoor de gevaren moeilijk in te schatten zijn. Wel is het duidelijk dat om instabiliteit van een brugpijler te voorkomen, er gebruik gemaakt dient te worden van een van de genoemde oplossingen. Botsingen met vuil en puin en eventueel boten kunnen een groot gevaar zijn voor de sterkte stijfheid en stabiliteit. Dit gevaar kan echter relatief simpel voorkomen worden door gebruik te maken van de geleide rail. Er wordt aanbevolen om in alle gevallen gebruik te maken van een dergelijke geleide rail. Dit levert namelijk ook voordelen op met betrekking tot het breken van de stroom en de daardoor beperkte stuwkracht. Verder zorgt de rail ervoor dat de stroming om de pijler geleid wordt waardoor de bodem erosie direct om de pijler ook wordt beperkt. De overige factoren hebben in de case study nauwelijks een rol van betekenis gespeeld maar moeten zeker niet onderschat worden. In andere omstandigheden kunnen deze namelijk wel relevant worden. De aanbeveling luidt dan ook om de minder inzichtelijke invloedsfactoren nader te onderzoeken om in een breed scala aan situaties een adequaat ontwerp voor een brugpijler te kunnen produceren.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding tot deze studie

De Tirin rivier in Afghanistan beperkt de daar optredende eenheden sterk in hun bewegingsvrijheid. De brug die ooit de rivier overspande is in dusdanig vervallen staat dat deze brug nauwelijks nog gebruikt kan worden. Dit heeft er toe geleid dat de Nederlandse eenheden in Afghanistan de opdracht hebben gekregen van de commandant TFU (Task Force Uruzgan) om deze brug te herstellen of indien nodig een nieuwe brug te bouwen.

Na nadere inspectie door Nederlandse Genie eenheden is besloten om een volledig nieuwe brug te bouwen gebruikmakend van (aanwezig) Bailey materiaal en 'geïmproviseerde' landhoofden. Vanwege de grote overspanning, dient er (minimaal) een pijler te worden gebouwd. Deze pijler zal in het ondiepe stromende water van de rivier de Tirin gebouwd moeten worden.

De vraag die op dit moment centraal staat bij de opdrachtgever, vakgroep Grond Weg en Waterbouw van bureau Geniewerken, is met welke factoren er rekening gehouden dient te worden nu de pijler in ondiep stromend water gebouwd moet worden. Voor de bouw van tussenondersteuning voor bruggen wordt veelal gebruik gemaakt van improvisatie met Bailey en andere militair beschikbare middelen. De volgende vraag is dus of er met deze middelen wel een dergelijke pijler gebouwd kan worden.

Al met al is er een behoefte ontstaan aan kennis over de factoren die van invloed zijn op de stabiliteit van pijlers in ondiep stromend water. Op deze manier kan er vervolgens beschouwd worden met welke militair beschikbare bouwmethode pijlers in ondiep stromend water gebouwd kunnen worden in het algemeen en voor de Tirin rivier in het bijzonder.

In overleg met Geniewerken en de sectie Civiele Techniek van de faculteit is de volgende doelstelling van het onderzoek geformuleerd:

'Het produceren van ontwerprichtlijnen aangaande brugpijlers, door een analyse te maken van de factoren die van invloed zijn op de draagkracht, stabiliteit en duurzaamheid van brugpijlers en een inventaris te maken van de beschikbare bouwmethoden'.

De case van de Tirin rivier zal worden gebruikt als uitgangspunt. Dit zorgt ervoor dat het onderwerp ingeperkt wordt met de volgende aspecten:

- De te onderzoeken pijlers bevinden zich in ondiep stromend water,
- Bij het opstellen van de ontwerprichtlijnen en bijbehorende bouwmethoden dient rekening gehouden worden met de militaire toepasbaarheid.

De militaire toepasbaarheid wordt bepaald door de complexiteit van een bouwmethode, de hoeveelheid (gespecialiseerd) materieel, materiaal en kennis er aanwezig dient te zijn om een dergelijke bouwmethode toe te passen. Er zal gekeken worden naar wat er binnen de Genie mogelijk is en welke technieken wellicht interessant zijn om aan te trekken.

1.2 Opzet eindstudie

Als eerste dienen de factoren die van invloed zijn op de stabiliteit van brugpijlers geïnventariseerd en geanalyseerd te worden. Hierbij zal gekeken worden welke problemen er zijn (Problematiek), hoe deze problemen veroorzaakt worden en wat hier tegen gedaan kan worden (Oplossingen).

Een inventarisatie van mogelijke bouwmethoden is de volgende stap die genomen dient te worden. Militaire toepasbaarheid wordt per methode besproken. Hieruit kunnen conclusies getrokken worden over welke methode het meeste perspectief biedt voor de Nederlandse Defensie.

Tot slot wordt er door middel van een case study, inzicht gegeven in de mate waarin de eerder geanalyseerde factoren invloed hebben op een bepaald ontwerp.

2 Factoren van invloed

2.1 Inleiding

Bij het ontwerpen van brugpijlers zijn er een groot aantal factoren die het ontwerp beïnvloeden. Gedacht kan worden aan het gewicht van de bovenbouw van de brug, de belasting op de brug en de invloed van de omgeving op de brugpijler.

De Nederlandse Genie eenheden maken al geruime tijd gebruik van allerlei geïmproviseerde constructiemethoden voor de bouw van brugpijlers. Een aantal jaren geleden zijn er verschillende voorschriften opgesteld waarin vermeld wordt op welke manieren brugpijlers kunnen worden gebouwd en met welke factoren rekening gehouden dient te worden. De factoren die genoemd worden hebben allen te maken met de belasting op de pijler door het gewicht van de brug of de belasting die via de brug over wordt gedragen op de pijler.

Uit deze gegevens blijkt dat er enkel kennis bestaat over de belasting op brugpijlers en hoe deze direct op de bodem kunnen worden overgedragen. Hierbij wordt gebruik gemaakt van roosterwerken die de belasting dusdanig over de bodem dienen te verdelen dat de maximale gronddruk niet wordt overschreden. Kennis en met name het materiaal waarmee het grondonderzoek wat hier aan vooraf gaat is beperkt. Verdere verdieping in deze materie wordt geleverd door het rapport 'Grondonderzoek in out of area gebieden' (Aarssen, 2008). Er is geen of nauwelijks kennis aanwezig over het bouwen van brugpijlers in rivieren en de invloed die een rivier heeft op het ontwerp van een pijler. De focus van dit onderzoek zal dan ook moeten liggen op omgevingsfactoren (rivier invloeden) die de sterkte, stijfheid of stabiliteit van brugpijlers kunnen beïnvloeden. De volgende factoren worden onderkend:

- Stuwkracht (water en/of ijs)
- Windkracht
- Erosie (door sediment transport)
- Temperatuur verschillen
- Aanvaring
- Aardbevingen
- Opdrijvende krachten

2.2 Stuwkracht (water en/of ijs)

Wanneer een pijlerconstructie zich in een rivier bevindt, zal deze een stuwkracht ondervinden door de stroming van het water op het loodrecht op de stroming staande oppervlak van de pijler. Deze stuwkracht is afhankelijk van de stroomsnelheid van het water en de vorm (en oppervlakte) van de pijlerconstructie.

De stuwkracht die een willekeurig lichaam in een stroom ondervindt is gedefinieerd als:

$$F = C_d \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A$$

Waarin:

F = De ondervonden stuwkracht (N)

A = Het aangestroomde oppervlak (het oppervlak haaks geprojecteerd op de stroming) (m^2)

ρ = De soortelijke massa van water (kg/m^3)

v = De stroomsnelheid van het water (m/s)

C_d = Weerstandscoefficiënt (dimensieloos)

De weerstandscoefficiënt van een object is afhankelijk van een aantal factoren, namelijk de vorm van het object, de stroming (uitgedrukt in het Reynolds getal) en de ruwheid van het object.

Het getal van Reynolds geeft het karakter van de stroming aan. Dit karakter kan laminair of turbulent zijn. Het Reynoldsgetal is als volgt gedefinieerd.

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot L}{\eta}$$

Waarin:

Re = Getal van Reynolds

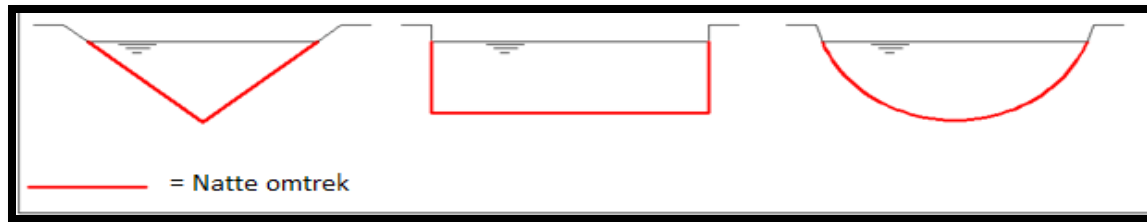
ρ = Dichtheid stromend medium (kg/m^3)

V = Snelheid stromend medium (m/s)

L = Natte omtrek (m)

η = Dynamische viscositeit ($kg/m \cdot s$)

De natte omtrek is de omtrek van het water dat in contact staat met de rivierbedding. Dit is de lengte van de rivierbedding waarover schuifspanningen kunnen ontstaan.



Figuur 1: Natte omtrek bij verschillende rivierbeddingen

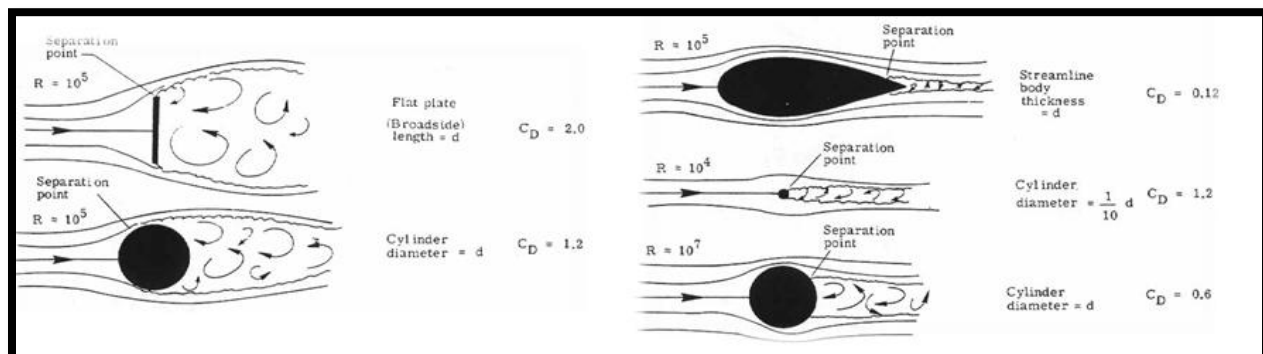
De ruwheid van het object wat de stuwkracht ondervindt hangt af van het materiaal waaruit het object bestaat. Deze ruwheid wordt soms uitgedrukt in het getal van Manning (Nortier, 1991). Om een indicatie te geven over de verschillen in ruwheid van een aantal materialen wordt in onderstaande tabel van een aantal materialen de ruwheid uitgedrukt.

Materiaal	Ruwheidsfactor ($s/m^{1/3}$)
Afgewerkt beton	0,011
Cementpleister	0,013
Gietijzer	0,014
Metselwerk	0,015

Tabel 1: Ruwheid van enkele materialen

Er zijn geen analytische methoden om de weerstandscoefficiënt van een object (in dit geval een brugpijler) te bepalen. Wanneer het Reynolds getal en de ruwheid van het object bekend is kan er door middel van tabellen en grafieken een schatting gemaakt worden van de weerstandscoefficiënt.

De weerstandscoefficiënt voor verschillende vormen wordt hieronder in Figuur 2 weergegeven.



Figuur 2: Stromingsgegevens van verschillende vormen [1]

Naast de stuwkracht zorgt het water ook voor een hydrostatische druk. Naarmate de diepte van het water toeneemt, zal deze hydrostatische ook toenemen. Omdat de hydrostatische druk aan alle zijde van de pijler gelijk is, heeft deze geen invloed op de buiging van een brugpijler. Wel geeft het een extra drukbelasting op het materiaal van de pijler. Vaak wordt gebruik gemaakt van beton (zeker bij grotere pijlers). De druksterkte van C20/25 beton is 15 N/mm^2 . Terwijl de maximale hydrostatische druk een factor 1000 lager is.

$$\begin{aligned}\text{Hydrostatische druk: } F &= \rho \cdot g \cdot h \\ F &= 1000 \cdot 10 \cdot 1,4 \\ F &= 14000 \text{ N/m}^2 \\ F &= 14 \cdot 10^{-3} \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

De hydrostatische druk zal daarom niet maatgevend zijn voor een ontwerp en zal dan ook niet verder gebruikt worden.

2.2.2 Problematiek

Wanneer de stroomsnelheid toeneemt, kan de stuwkracht dusdanig groot worden dat de brugpijler deze kracht niet kan opnemen. Deze horizontale kracht zal moeten worden overgedragen aan de fundering van de pijler.

2.2.3 Oplossingen

Er zijn twee manieren waarop er kan worden omgegaan met de stuwkracht. Dat is enerzijds door het probleem te voorkomen en anderzijds door de gevolgen te beperken.

- a) 1 Zoals besproken is de grootte van de stromingsdruk afhankelijk van een aantal parameters. Om de stromingsdruk te beperken zullen één of meerdere parameters moeten worden beïnvloed. De twee parameters die beïnvloed kunnen worden zijn het aangestroomde oppervlak en de weerstandscoefficiënt. Beide zijn afhankelijk van de vorm en grootte van de brugpijler. Het aangestroomde oppervlak kan worden verkleind door een slankere brugpijler te ontwerpen. Dit gaat echter vaak ten koste van de stijfheid van de constructie. Wel kan de stuwkracht beperkt worden door een gestroomlijnd karakter te geven waardoor de weerstandscoefficiënt verlaagd en mogelijk het aangestroomde oppervlak verminderd.

2 Door in het traject voor de brugpijler de stroming te 'breken' door middel van een barrière, wordt de stroming om de pijler heen geleid waardoor de stuwkracht beperkt wordt.

- b) Wanneer het verkleinen en/of stroomlijnen van het aangestroomde oppervlak niet mogelijk is, zal de pijlerconstructie dusdanig stijf geconstrueerd moeten worden dat deze de horizontale kracht van het water kan opnemen dan wel overdragen op de onderliggende fundering.

2.2.3 Ijs

In gebieden waar de temperatuur voor lange tijd ver onder het vriespunt ligt, zal niet alleen de kracht die water uitoefent een probleem zijn maar tevens ijsvorming. Vanwege de vaste vorm die ijs heeft, gaat de analyse uit de vorige paragrafen aangaande de stuwkracht van water niet op. De kracht die drijvend ijs uitoefent op een object kan het beste benaderd worden als een botsing van een massa op een constructie. De kracht die een hoeveelheid ijs uit kan oefenen is afhankelijk van de massa en de snelheid van het ijs. Het is zeer moeilijk om deze kracht te bepalen. In de praktijk wordt gewerkt met een maximale ijsdruk van 2200 kN/m^2 betrokken op de verticale ijs oppervlakte. Door de grootte van deze kracht wordt er vaak voor gekozen om ijsbrekende constructies te bouwen in het traject alvorens het ijs de pijler nadert. Bij extreme ijsvorming wordt er zelfs gesproken over het gebruik van springstof om de dimensies van het drijvend ijs te beperken. (Geest, 1984)

De manier waarop de kracht van een hoeveelheid ijs overgedragen wordt op een constructie is hetzelfde als bij een botsing. In de paragraaf botsing zal hier dan ook verder op worden ingegaan.

2.3 Windkracht

Windkracht kan worden vergeleken met de stromingsdruk die in de vorige paragraaf is besproken. Het aangestroomde oppervlak is maatgevend voor de windkracht. Deze kracht loodrecht op een object wordt ook wel 'pressure drag' genoemd.

$$F = C_d \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A$$

Waarin:

F = De ondervondenwindkracht (N)

A = Oppervlak loodrecht op de wind (m^2)

ρ = De soortelijke massa van lucht (kg/m^3)

v = De windsnelheid (m/s)

C_d = Weerstandscoefficiënt (dimensieloos)

Naast de bovengenoemde kracht die loodrecht op een object staat (zowel de pijler als de brug zelf), bestaat er ook een andere kracht die op een object wordt uitgeoefend door de wind. Namelijk de windwrijving op de oppervlakten evenwijdig aan de richting van de wind. Deze kracht wordt ook wel 'friction drag' genoemd. 'Friction drag' wordt op dezelfde manier berekend als 'pressure drag', echter als oppervlak wordt nu het oppervlak van het object evenwijdig aan de wind gebruikt.

Omdat het voor deze objecten moeilijk te bepalen is welk oppervlak zich loodrecht en welke zich evenwijdig aan de wind bevinden, zijn zowel de 'friction drag' als ook de 'pressure drag' hier samen genomen in een drag coëfficiënt. Deze drag coëfficiënt is hetzelfde als de weerstandscoefficiënt die in het hoofdstuk stuwkracht aan bod is gekomen. Zoals bij het onderwerp stuwkracht al naar voren is gekomen is de weerstandscoefficiënt alleen empirisch te bepalen. In figuur 2 op blz. 10 zijn een aantal vormen met de bij behorende weerstandscoefficiënt weergegeven.

De snelheid van de wind is moeilijk te bepalen omdat er vaak sprake is van een grote fluctuatie over de tijd dat de wind aanwezig is. Hierdoor wordt er in de literatuur gewerkt met de gemiddelde windsnelheid en met enkele kansverdelingfuncties voor de afwijkende windsnelheden. Dit is voornamelijk van belang bij zware stormen en situatie waarbij rukwinden kunnen ontstaan.

Wanneer er niet voldoende data aangaande de wind in een gebied aanwezig is kan worden volstaan met het gebruik van een veiligheidsfactor van 1,5 op de gemiddelde windsnelheid. (Fox, 2004)

2.3.1 Problematiek

De kracht die de wind uitoefent zorgt voor een extra horizontale kracht op een brugpijler. Deze kracht zal moeten worden opgenomen of worden voorkomen.

2.3.2 Oplossingen

De oplossingen zijn dezelfde als bij de stuwkracht van water. Enerzijds kan de brugpijler stijf geconstrueerd worden waardoor de extra kracht kan worden overgedragen op de fundering, anderzijds kan de brugpijler gestroomlijnd geconstrueerd worden waardoor de windkracht minimaal is.

Door het oppervlak van de brugpijler evenwijdig en loodrecht op de wind te beperken wordt de belasting als gevolg van de windkracht verminderd. Het beperken van de oppervlakte kan bijvoorbeeld gedaan worden door gebruik te maken van een vakwerkconstructie.

2.4 Sediment transport

Door de stroming van water door een rivierbedding ontstaat er een wrijving tussen het water en het sediment waar een rivierbedding uit bestaat. Door deze wrijving is het mogelijk dat (kleinere) deeltjes sediment los raken van de bedding en mee stromen met de rivier om vervolgens op een andere locatie te worden afgezet. Doordat sediment uit materialen met verschillende afmetingen bestaat zijn er ook verschillende manieren waarop het sediment getransporteerd wordt.

Bed load

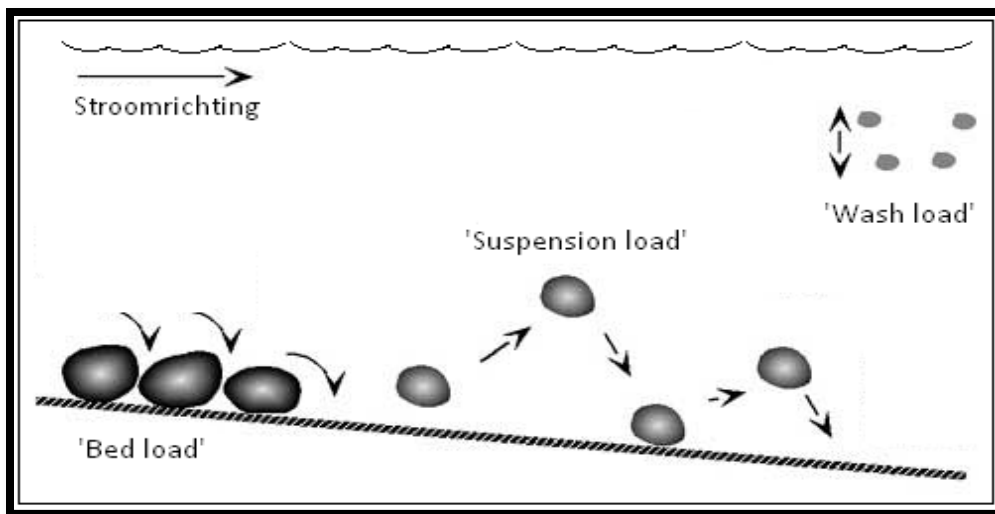
De zwaarste korrels in het sediment zullen logischerwijs niet snel getransporteerd worden. Wanneer de stroomsnelheid en de daaraan gekoppelde schuifkracht met het sediment echter groot wordt zal ook dit sediment in beweging komen. De sedimentkorrels zullen rollend over de bodem (zie figuur 1) van locatie veranderen.

Suspension load

Wanneer sediment korrels lichter zijn, zullen ze bij een zelfde stroomsnelheid over een grotere afstand getransporteerd worden ten opzichte van de zware korrels. Deze middelzware korrels maken een soort sprongen waarvan de lengte afhankelijk is van de stroomsnelheid en het gewicht van de korrel.

Wash load

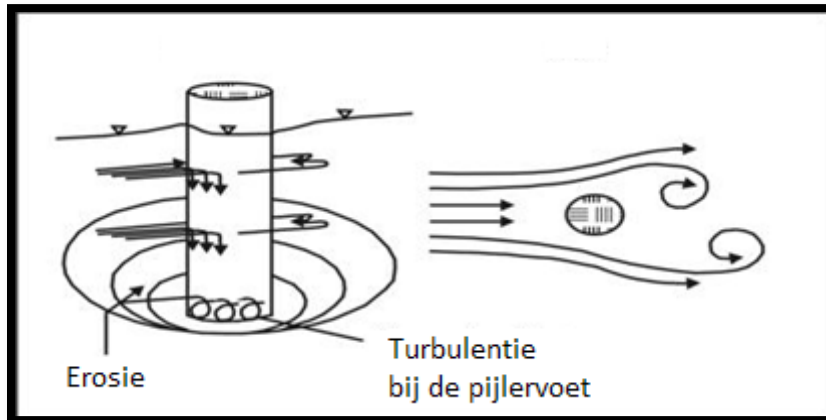
De lichtste korrels zijn continu in beweging. Ze zijn als het ware opgelost in het water. Deze korrels worden pas afgezet wanneer de stroomsnelheid gelijk is aan nul.



Figuur 3: Verschillende manieren van sediment transport [2]

2.4.1 Problematiek

Door de verstoring van de stroming door bijvoorbeeld een brugpijler, ontstaat er vaak turbulente stroming rondom de pijler. Dit zorgt voor een complexe situatie aangaande het sediment transport. Dit resulteert in de in figuur 4 weergegeven kuilvorming ook wel 'Local scour' genoemd.



Figuur 4: Local scour [2]

Verschillen in de vorm van een pijler geven ook verschillen in de afmetingen en de vorm van de erosie. In figuur 2 op blz. 8 staan enkele voorkomende vormen van de turbulenties die ontstaan rondom een pijler. De erosie die dat als gevolg heeft zal een soortgelijke vorm aannemen.

Wanneer de stroomsnelheid omhoog gaat, zullen ook de gevolgen van deze speciale vorm van erosie toenemen. Verder zijn de karakteristieken van het betreffende sediment van invloed op de gevolgen. Bij zwaardere en/of hardere sedimenten zal local scour minder problematisch zijn dan bij lichte en/of zachtere sedimenten.

Local scour kan ervoor zorgen dat delen van de pijler of fundering van de pijler worden blootgesteld aan water. Dit kan de constructie aantasten waardoor de stabiliteit van een brugpijler negatief beïnvloed kan worden.

Vanwege de complexiteit van de stroming om een pijler is er geen eenduidige vergelijking bekend waarmee je aan de hand van verschillende parameters de diepte van de erosie kunt bepalen. Hieronder zal uiteengezet worden welke parameters een rol spelen, verder zullen er een aantal gebruikte relaties getoond worden. Als eerste wordt er onderscheidt gemaakt tussen 'schoon water erosie' (clear water scour) en 'sediment erosie' (sediment transport scour).

Schoon water erosie: Erosie om de pijlervoet door de stroming van water. Er wordt sediment rondom de pijler verwijderd en stroomt mee. Geen aanvulling van het sediment. Uiteindelijk evenwicht wordt bereikt als een asymptotische diepte is bereikt.

Sediment erosie: Erosie rondom de pijlervoet door de stroming van water met sediment. Er wordt sediment verwijderd maar tevens aangevoerd. Uiteindelijk evenwicht wordt bereikt als de toevoer en afvoer gelijk is aan elkaar.

Enkele randvoorwaarden die aan de gebruikte relaties vooraf gaan:

- Het gaat om een enkele cilindrische pijler
- Dwarsprofiel van de rivier is rechthoekig
- De rivier kent een uniforme constante stroming
- Het sediment is vrij in beweging (geen cohesie)

Binnen deze randvoorwaarden hangt de diepte van de erosie af van de volgende parameters:

ρ = de dichtheid van het water (kg/m^3)

ν = viscositeit van het water (m^2/s)

ρ_s = dichtheid van het sediment (kg/m^3)

d = gemiddelde diameter sediment (m)

h = Diepte van het water (m)

S_f = verhang van de rivier (m/m)

U = Stroomsnelheid (m/s)

D_c = Diameter van de pijler (m)

Zoals eerder besproken worden er meerder relaties gebruikt om de uiteindelijke erosie diepte (d_s) te berekenen. De meest eenvoudige worden hieronder weergegeven.

$$\text{Schoon water erosie: } d_s = 0.00022 \left(\frac{UD_c}{v} \right)^{0.619} \quad (\text{Shen, 1971})$$

$$\frac{d_s}{D_c} = 1.35 \left(\frac{h}{D_c} \right)^{0.3} \quad (\text{da Cunha, 1970})$$

$$\text{Sediment erosie: } \frac{d_s}{D_c} \approx 2.0 \text{ tot } 2.3 \quad (\text{Shen, 1971})$$

$$\frac{d_s}{D_c} = 1.5 \tan h \left(\frac{h}{D_c} \right) \quad (\text{Breusers et al, 1977})$$

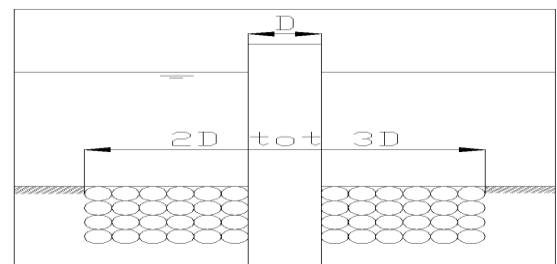
Ondanks alle voorwaarden die aan deze relaties worden gekoppeld, kunnen ze een goede indicatie geven van de erosie diepte in een willekeurige situatie. Kanttekening is nog steeds dat dit empirisch bepaalde vergelijkingen zijn en dat er andere factoren kunnen zijn die de uitkomst beïnvloeden. Deze vergelijkingen zijn allen afkomstig uit het boek 'Fluvial Hydraulics. Flow and transport processes in channels of simple geometry' van Walter H. Graf (1998).

2.4.2 Oplossingen

Om de erosie bij een pijlervoet tegen te gaan zijn er een aantal oplossingen te noemen.

a) Sediment verzwaring

Door rondom de pijler het sediment te verwijderen en geheel of gedeeltelijk te vervangen voor stenen, wordt voorkomen dat de stroming invloed heeft op de voet van de pijler. Een goed alternatief voor het gebruik van stenen zijn geotextiele zandelementen.

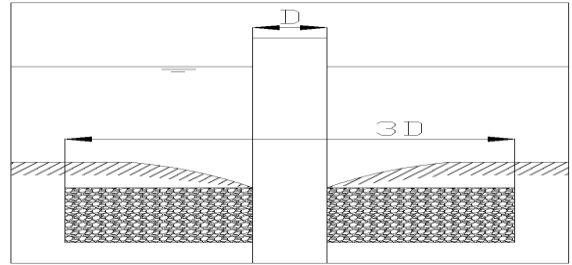


Figuur 5: Sediment verzwaring

Deze geprefabriceerde zakken kunnen lokaal gevuld worden met fijnkorrelig materiaal. Deze zandelementen zijn als zakken of matten verkrijgbaar (geobags, geomatten, geotubes etc.). Bij het gebruik van dergelijke geotextielen zorgt dit voor beperking van de erosie en een verzwaring van de pijlervoet waardoor de stabiliteit toeneemt. (Nederlandse Geotextielorganisatie, 2004)

a) *Funderingsvoet*

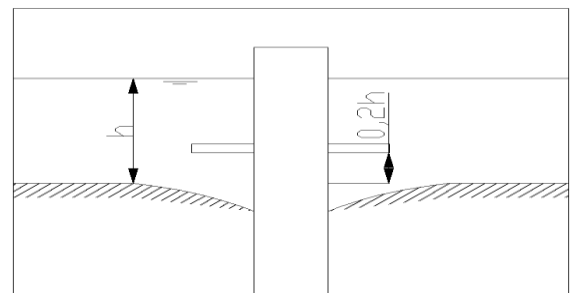
Een andere oplossing is het storten van een hoge funderingsvoet. Hierdoor wordt voorkomen dat er veel sediment verwijderd kan worden. Deze methode is echter economisch minder aantrekkelijk in verband met de kosten van het beton. Verder dient er dus onder water in de rivierbedding beton gestort worden wat de nodige complicaties met zich meebrengt.



Figuur 6: Funderingsvoet

b) *Pijlerkraag*

Er is gebleken dat wanneer de brugpijler wordt voorzien van een ringvormige kraag, dit de diepte van de sediment erosie vermindert. Wanneer de kraag op $0,2 \cdot h$ (h = diepte van het water) wordt geplaatst vermindert dit de erosie met 50%. (Graf, 1998)



Figuur 7: Pijlerkraag

c) *Gestroomlijnde pijler*

Wanneer het aangestroomde oppervlak gestroomlijnd wordt geconstrueerd wordt de turbulentie van de stroming gereduceerd waardoor de gevolgen van local scour verminderen.

2.6 Temperatuur verschillen

In gebieden zoals Afghanistan heerst er een klimaat waarbij extreme hitte ($+ 40^{\circ}\text{C}$) wordt afgewisseld met extreme kou (-40°C). Deze extreme temperatuur verschillen zorgen voor problemen in civiel technische constructies. Niet alleen praktische problemen bij de bouw, maar ook ontwerpproblemen. Verschillende temperaturen kunnen zorgen voor verschillende mate van krimp in betonconstructies en spanningen in staalconstructies.

Het krimpen van een materiaal ten gevolge van een temperatuur daling wordt ook wel thermische krimp genoemd. Deze thermische krimp zorgt voor vervormingen in materialen. De thermische uitzettingscoëfficiënt geeft een beeld van de mate van krimp die een bepaald materiaal onder gaat per graad temperatuur verschil.

Hieronder is een rekenvoorbeeld van krimp weergegeven.

De zon warmt een grindbetonplaat met een lengte 10 m op van 15 °C naar 40 °C.

Temperatuurverhoging: 25 °C

Thermische uitzettingscoëfficiënt: $12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

Per meter zet de plaat uit: $25 \times (12 \times 10^{-6})$ meter

Dat is: 300×10^{-6} meter = 0,3 mm/m

De plaat is 10 meter lang, dus de hele plaat zet uit: $10 \times 0,3 = 3$ mm.

2.6.1 Problematiek

In het bijzonder in betonconstructies zijn temperatuur verschillen een probleem. Door dat aanwezig wapeningsstaal niet (in mindere mate) krimpt ontstaan er scheuren nabij dit wapeningsstaal. Het grote probleem is hier het verschil in krimp en niet de krimp zelf. Dit verschil in krimp ontstaat ook bij temperatuurverschillen binnen een constructie. Een brugpijler die in een rivier geplaatst is onderhevig aan de temperatuur verschillen tussen het water en de omgevingstemperatuur. Dit kan tot scheurvorming leiden. Deze scheurvorming kan ervoor zorgen dat wapening bloot komt te staan aan water en vuil waardoor deze kan gaan roesten.

Bij extreme vervormingen kan de stijfheid en de stabiliteit van een constructie in het geding komen. Uit het rekenvoorbeeld komt echter naar voren dat de vervorming te verwaarlozen is, waardoor de stijfheid en stabiliteit hierdoor niet wordt beïnvloedt.

2.6.2 Oplossingen

Wanneer gewerkt wordt met hoogwaardige materialen is de kans op scheurvorming beperkt. De kwaliteit van de uitvoering van de bouw (met name met beton storten) is een tweede variabele die de scheurvorming als gevolg van temperatuur verschillen kan beperken.

Een andere oplossing voor scheurvorming ten gevolge van verschillen in krimp kan zijn om de constructie waar een verschil in temperatuur ontstaat van elkaar te scheiden. Op deze manier krijgt de constructie ruimte om te krimpen. Door het dynamische karakter van het waterpeil in een rivier is dit echter lastig te realiseren. Verder kan er door warmte isolerende maatregelen te nemen de temperatuurverschillen geminimaliseerd worden en zal er dus geen of nauwelijks scheurvorming aanwezig zijn.

Verder kan er door middel van extra wapening voor gezorgd worden dat scheurvorming beperkt blijft.

De mogelijkheden zijn:

- Dezelfde hoeveelheid wapening, deze wapening echter verzorgen door gebruik te maken van staven met een kleinere doorsnede.
- Meer wapening
- Een grotere betondekking (economisch minder aantrekkelijk)

Bij het gebruik van meer wapening of meer maar kleinere staven is het van belang dat de afstand tussen de staven niet te klein wordt in verband met het storten en verdichten van het beton. Wanneer de afstand te klein is, kan er voor gekozen worden om staven te bundelen of (onder bepaalde voorwaarden) de wapening in verschillende lagen aan te brengen (Sagel, 2004). Krimpwapening (ook wel krimpnet) is een net van wapeningsstaven geproduceerd om krimp te voorkomen. De principes van meer staven en in verschillende lagen is hier dus feitelijk toegepast.

2.7 Botsingen

Botsingen van allerlei objecten met een brugpijler, kan beschadigingen opleveren aan deze pijler. In Afghanistan zijn voorbeelden bekend waarbij, met name in de winter wanneer er een groot debiet is, er delen van boomstammen met de stroom worden meegesleurd. Bij botsing met een brugpijler zorgt dit voor beschadigingen aan het materiaal die kunnen lijden tot aantasting van de sterkte, stijfheid en/of stabiliteit van de pijler. Het gewicht, de snelheid en de vorm van het object bepalen de grootte van de kracht die uitgeoefend wordt en daarmee de omvang van de schade aan de pijler.

Een speciale vorm van een botsing is een aanvaring. Wanneer een schip in aanvaring komt met een brugpijler kan dit voor een enorme horizontale kracht zorgen. De grootte van deze kracht is afhankelijk van de massa van het schip, de aanvaarsnelheid en de kracht die opgenomen wordt door de 'kreukelzone' van het schip.

Met name vanwege deze kreukelzone is het zeer complex om deze kracht exact te bepalen. Er zijn richtlijnen bekend waar de aanvaringskracht per scheepsklasse wordt beschreven. Deze zijn echter niet algemeen geaccepteerd.

De volgende tabel geeft een overzicht van de aanvaringskracht per scheepsklasse.

<i>Scheepsklasse</i>		<i>Aanvaringskracht (kN)</i>
0	Recreatievaart	200 - 500
I		500
II	Tanker	1000
III	Containerschip	1500
IV	Bulkcarrier	2000
V		2500
VI	Vier-bakduweenheden	5000

Tabel 2: Aanvaringskracht per scheepsklasse (Geest, 1984)

2.7.1 Problematiek

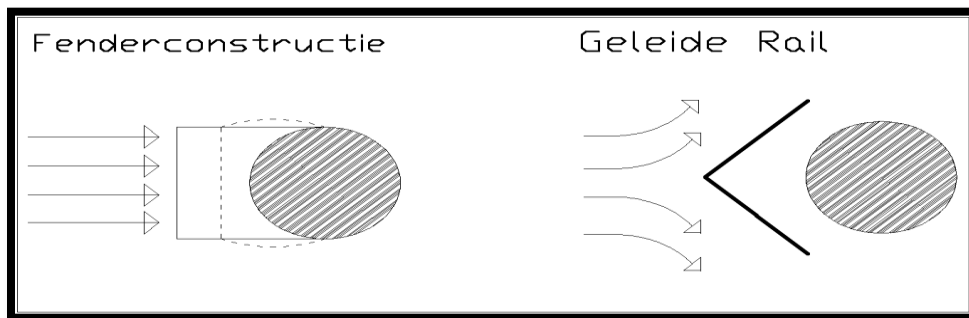
Bij een botsing tussen een willekeurig object (schepen, puin etc.), kunnen grote horizontale krachten ontstaan in een brugpijler zodat deze mogelijk kan bezwijken en daarmee de stabiliteit van de brug in gevaar brengt.

2.7.2 Oplossingen

De horizontale krachten in een brugpijler ten gevolge van een aanvaring zijn dusdanig groot en de kans op een aanvaring dusdanig klein dat de discussie ontstaat of een brugpijler hier tegen bestand dient te zijn. Wanneer dit wel dient te gebeuren zal de pijler en de daaronder liggende fundering bestand moeten zijn tegen de aanvaringskrachten. Dit zal gezien de grote materiaalbehoefte die dat met zich meebrengt niet vaak gebeuren. Vaker gebeurt het dat er voorzieningen getroffen worden om de horizontale krachten te beperken of te voorkomen. Dit kan op de volgende manieren:

- a) Het voorkomen van een aanvaring door alarmvoorzieningen in het traject voor de brugpijler en/of alarmvoorzieningen op de pijler zelf. Gedacht kan worden aan licht en geluid signalen.

b) Het beperken van de gevolgen van een aanvaring door een beschermingsconstructie om de pijler te construeren. Dit kan in de vorm van een geleide rail waardoor een schip langs de pijler wordt geleid. Een andere mogelijkheid is om een kreukelzone voor de pijler te creëren waardoor de botsingskracht wordt geabsorbeerd tot een aanvaardbaar niveau. Een kreukelzone is echter maar eenmalig te gebruiken. Fenderconstructies zijn als het ware terugverende kreukelzones. Dit wordt gerealiseerd door bijvoorbeeld een aantal autobanden aan de brugpijler te bevestigen. De kracht van een botsing wordt dan geheel of gedeeltelijk geabsorbeerd door de autobanden. De principes van deze beschermingsconstructies worden in onderstaande figuur schematisch weergegeven.



Figuur 8: Beschermingsconstructies

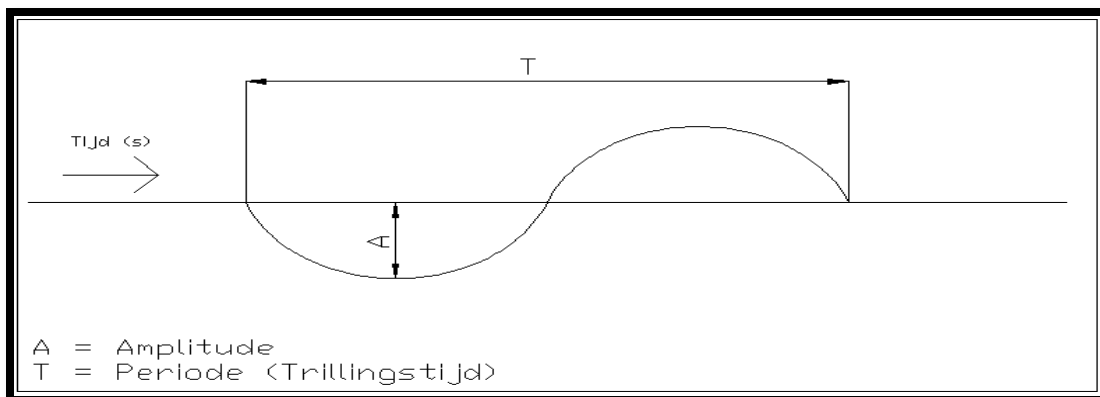
2.8 Aardbevingen

De Nederlandse Genie kan tegenwoordig overal ter wereld worden ingezet. Dit zorgt ervoor dat de inzet ook kan plaatsvinden in gebieden die regelmatig te maken hebben met aardbevingen. In deze paragraaf worden de problemen die door aardbevingen ontstaan besproken en mogelijke oplossingen aangedragen.

Een aardbeving is een trilling of schokkende beweging van de aardkorst. Aardbevingen ontstaan op verschillende wijzen. De belangrijkste oorzaken zijn als volgt:

- a) *Platentektoniek* = De platen waar de aardkorst uit bestaat schuiven langs of over elkaar heen waardoor trillingen ontstaan.
- b) *Chemische veranderingen* = Op grote diepte in de aarde kan de chemische samenstelling van de aanwezige materie veranderen waardoor er een grote hoeveelheid energie vrijkomt. Deze energie kan zorgen voor een aardbeving
- c) *Kleinschalige aardbevingen* = Aardbevingen door bijvoorbeeld het instorten van mijnen, grote explosies of vulkanische activiteiten worden als kleinschalig ervaren.

De trillingen die door aardbevingen ontstaan kunnen gezien worden als een enkelvoudige harmonische trilling. Dergelijke trillingen hebben een bepaalde periode en een amplitude. De periode is de tijd (in seconden) benodigd voor een volledige heen en weer gaande trilling. De amplitude is de breedte van de trilling van af het rustpunt tot aan de uiterste stand.



Figuur 9: Enkelvoudige harmonische trilling

Iedere constructie heeft zijn eigen frequentie die onder andere afhankelijk is van de stijfheid van de constructie. Ook deze trilling heeft een bepaalde periode en een amplitude. De trilling zorgt voor een heen en weer gaande beweging in de constructie. Bij het ontwerpen van een constructie wordt hier rekening mee gehouden waardoor deze eigen trillingen geen gevaar zijn voor de sterkte, stijfheid en stabiliteit van de constructie.

2.8.1 Problematiek

De trilling die ontstaan bij een aardbeving geven een extra beweging (en dus spanningen) aan een constructie. Wanneer deze beweging of amplitude van de aardbeving zorgt voor te grote vervorming in een constructie zal deze bezwijken. Wanneer de constructie niet bezwijkt vanwege de amplitude, zijn er drie scenario's die kunnen optreden.

1. Wanneer de periode van de aardbeving gelijk is aan de periode van de natuurlijke trilling van een constructie, zorgt dit voor resonantie (=opslingering) van de trilling waardoor er ontoelaatbare spanningen in een constructie kunnen ontstaan en deze daardoor bezwijkt.
2. Als de periode van de aardbeving groter is dan de periode van de natuurlijke trilling van een constructie zal de trilling bij de fundering de constructie in gaan en vervolgens aan de bovenkant van de constructie deze weer verlaten.
3. Als de periode van de aardbeving kleiner is dan de periode van de natuurlijke trilling van een constructie, zal de heengaande beweging van de aardbeving de constructie in gaan en voor dat deze de top van de constructie heeft bereikt zal de teruggaande beweging van de aardbeving de constructie betreden. Door het verschil in beweging binnen de constructie kunnen ontoelaatbare spanningen of vervormingen ontstaan.

2.8.2 Oplossingen

Om een constructie te ontwerpen zodat deze bestand is tegen alle aardbevingen is bijna onmogelijk. Het ontwerp kan echter wel voorzien in de nodige maatregelen die ervoor zorgen dat de schade beperkt blijft. Een aantal zaken zijn hierbij belangrijk.

- a) Zoals eerder beschreven is de natuurlijke trilling van belang voor het scenario dat zich afspeelt bij een aardbeving. Hierbij is gebleken dat de schade minder is naar mate een constructie stijver is geconstrueerd. Stijfheid van de constructie is dus van belang.

- b) Wanneer de trillingen veroorzaakt door een aardbeving in een slappe grondlaag komen, zal de sterkte van de trilling sterk afnemen. In een harde grondlaag wordt de sterkte van de trilling nauwelijks beïnvloed. Wanneer een constructie op palen is gefundeerd, waarbij de palen door een slappe grondlaag heen in een sterke grondlaag zijn geplaatst, zorgt dit voor een verschil in beweging (trilling) tussen de sterke en de slappe grondlaag. Dit zorgt voor spanningen en mogelijk scheuren in de funderingspalen. Door de paalfundering zo te construeren dat deze ook horizontale krachten kan opnemen (bv. diagonaal geplaatste palen), zijn de palen beter tegen scheuren bestand.
- c) De situatie die onder b) is beschreven geldt ook voor de rest van de constructie. Wanneer er ergens in de constructie krachten worden opgenomen door middel van bijvoorbeeld vervorming, zullen ook hier verschillen in beweging ontstaan waardoor er spanningen in de constructie kunnen ontstaan. Dit is vaak het geval bij de aansluiting van de fundering op de rest van de constructie of de aansluiting van andere constructie onderdelen.

2.9 Opdrijvende krachten

Binnen de Genie wordt er in verschillende voorschriften gesproken over drijvende ondersteuning voor bruggen. Voor bruggen waar een geringe belasting op staat kunnen dergelijke ondersteuning voldoen. Bij het gebruik van drijvende ondersteuning is de opdrijvende kracht van water van belang voor de belasting die een dergelijke ondersteuning kan overdragen. De natuurwet die daarbij van belang is, is de wet van Archimedes.

'De opwaartse kracht die een lichaam in een vloeistof of gas ondervindt is even groot als het gewicht van de verplaatste vloeistof'

Wanneer er gebruik gemaakt van drijvende ondersteuning is het gewicht van de verplaatste vloeistof van belang. De kracht die een dergelijke ondersteuning kan overdragen is dus:

$$F_{pijler} = g \cdot \rho_{vloeistof} \cdot V$$

Waarin:

F_{pijler} = Kracht die de ondersteuning kan overdragen (N)

g = Valversnelling ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$)

$\rho_{vloeistof}$ = Dichtheid van de vloeistof (kg/m^3)

V = Volume van de verplaatste hoeveelheid vloeistof (m^3)

2.9.1 Problematiek

De opwaartse kracht is bij het gebruik van drijvende ondersteuning juist een voordeel en geen probleem. Bij vaste brugpijlers zorgt de opwaartse druk voor een vermindering van de belasting op de fundering van de pijler. Wanneer er gebruik gemaakt wordt van een niet massieve constructie (zoals bij een bascule kelder) kan de opwaartse druk de constructie doen opdrijven

2.9.2 Oplossingen

Door de brugpijler te verankeren in de bodem door middel van bijvoorbeeld trekpalen wordt er voorkomen dat de constructie kan opdrijven.

3 Bouwmethodes

In dit hoofdstuk wordt gekeken naar de mogelijke methoden voor het bouwen van brugpijlers. Als eerste wordt er gekeken naar de gebruikte methoden bij de genie en welke problemen daarbij spelen. Daarna zullen een aantal civiel gebruikte methoden worden besproken.

3.1 Genietechnieken

Binnen de Genie zijn er een aantal bouwmethodes die worden gebruikt. Deze zijn verwerkt in handboeken (HB) en voorschriften (VS). Aan de hand van deze naslagwerken kan er per situatie besloten worden welke bouwmethode er gebruikt kan worden. In de volgende paragrafen worden de handboeken besproken die elk technieken bevatten die door de Genie gebruikt worden.

3.1.1 HB5-51 Bruggen niet standaard

Hierin worden een aantal simpel geconstrueerde pijlers besproken te weten, pijlers met behulp van stapellichamen (van verschillende materialen) pijlers met behulp van jukken en/of schragen. Afdracht van krachten op de grond wordt verzorgd door roosterwerken die de kracht verdeeld over een groter oppervlak. Het bepalen van maximaal toelaatbare gronddrukken is niet terug te vinden in dit handboek. Wel wordt geadviseerd om roosterwerken een fractie hoger te plaatsen dan uiteindelijk nodig is in verband met de zetting van de grond die gaat plaatsvinden.

3.1.2 HB5-164 Technieken Baileybrug

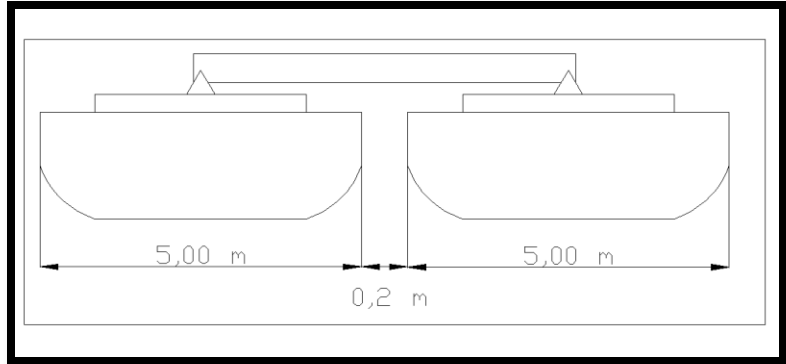
In dit handboek worden technieken uiteengezet om zowel bruggen, brugpijlers als landhoofden te construeren van Bailey materiaal. Een aantal standaard (Bailey) pijlerconstructie worden weergegeven. Als fundering wordt wederom gebruikt gemaakt van een roosterwerk die de belasting van de brug op de grond overdraagt.

Een techniek die in dit handboek ook aan bod komt, is het gebruik van drijvende ondersteuning. Door de fabrikant van Bailey zijn er standaard 'boten' gefabriceerd die gebruikt kunnen worden als drijvende ondersteuning.

Bij deze bouwmethode wordt de belasting opgevangen door drijfkracht van de ondersteuning.

De standaard dekschuit die gebruikt wordt voor het bouwen van drijvende ondersteuning heeft een drijfvermogen van 800 kN. Deze

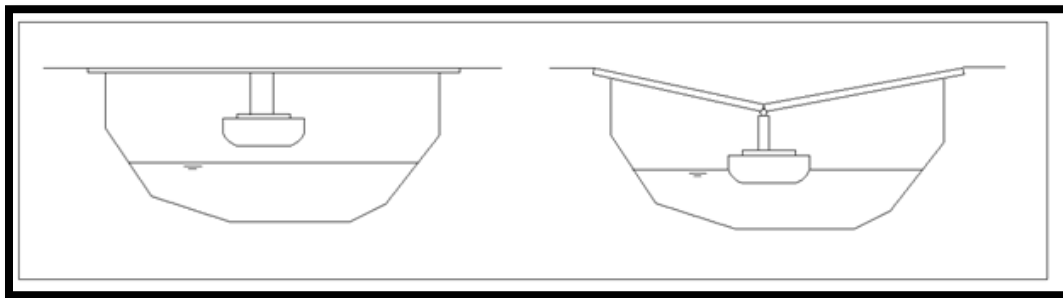
dekschuiten kunnen echter aan



Figuur 10: Dubbele dekschuit

elkaar gekoppeld worden waardoor het totale drijfvermogen theoretisch onbeperkt kan worden uitgebreid. De dekschuiten worden met een koppelframe aan elkaar bevestigd.

Stabiliteit kan een probleem zijn bij het gebruik van drijvende ondersteuning. Zowel horizontaal als verticaal kunnen er veranderingen optreden. Wanneer het waterpeil stijgt of daalt, zal de ondersteuning mee dalen of stijgen hierdoor kunnen er spanningen ontstaan in het brugdek. Om dit te voorkomen kan er gebruik gemaakt worden van verschillende brugdelen tussen de pijlers. Wanneer deze scharnierend verbonden worden is enige stijging of daling van de ondersteuning toelaatbaar. In Figuur 10 is dit sterk overdreven schematisch weergegeven.



Figuur 11: Vast brugdek en een scharnierend brugdek.

Horizontaal wordt de drijvende ondersteuning beïnvloed door zowel wind als stroming. De dekschuiten kunnen op deze manier afdrijven waardoor de stabiliteit van de brug in gevaar komt. Dit kan verholpen worden door de ondersteuning te ankeren aan de rivierbedding of aan de oever van de rivier.

In de praktijk is deze vorm van ondersteuning niet te gebruiken als (semi) permanente oplossing. De verankeringen zullen ten alle tijden onder toezicht moeten staan waardoor deze methode praktisch niet haalbaar is.

3.1.3 Mabey & Johnson 67C03'

In deze uitgave van de fabrikant Mabey & Johnson (tevens fabrikant Bailey) worden een aantal standaard brugpijler constructies met Mabey & Johnson materiaal weergegeven. De technieken die hier centraal staan zijn dezelfde als bij het gebruik van Bailey materiaal. Als fundering wordt wederom gebruikt gemaakt van een rooster werk die de belasting op en van de brug op de grond overdraagt.

3.1.4 Overige

In oudere voorschriften van de Genie zijn wel gegevens te vinden over het funderen van onder andere brugpijlers. Zo staan er in 'VS5-1 Verzameling van Genietechnische gegevens' uit 1960 gegevens over het gebruik van heipalen en de technieken die daarbij komen kijken. Inmiddels heeft de Genie echter niet meer voldoende materieel en kennis in huis voor de toepassing van paalfunderingen.

3.1.5 Deelconclusie

Uit de besproken gegevens komt dus voort dat de bouw van de brugpijler beheerst wordt door de mogelijkheden van de Genie. Waar niet of nauwelijks kennis over aanwezig is, is het funderen van brugpijlers anders dan op staal. De bouwmethodes die in het volgende hoofdstuk besproken gaan worden zullen dan ook voornamelijk richten op het funderen van brugpijlers in ondiep stromend water.

3.2 Civiele technieken

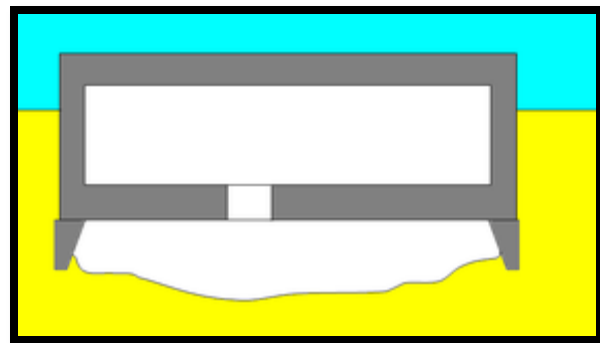
Er zijn legio funderingstechnieken te noemen die civiel worden gebruikt. In de volgende paragrafen worden de belangrijkste technieken besproken. Tevens wordt aangegeven op welke manier deze technieken toepasbaar zijn voor de genie.

3.2.1 Caissonfundering

Een caisson (=zinkstuk) is een kubusvormige constructie die men laat zakken tot een draagkrachtige bodem door onder de constructie grond te verwijderen. Een caisson kan uit betonnen, stalen of houten onderdelen bestaan. Op deze manier vormt de caisson funderingsvoet op staal. Caissonfunderingen worden toegepast bij diepliggende kelders en pijlers.

Het zinkstuk bestaat uit een bak met in de vloer een toegangsluik. Langs de buiten omtrek van de bak bevindt zich een snijrand. Deze snijrand zorgt ervoor dat het caisson door de bodem heen zakt. De grond die daardoor omhoog in de bak wordt geduwd, wordt afgevoerd door van te voren geïnstalleerde pijpleidingen. Tevens worden er leidingen geplaatst voor aan en afvoer van water en elektriciteit.

Door met hogedrukspuiten de grond onder het caisson weg te spuiten bezwijkt de grond onder de snijranden waardoor de caisson gaat zakken. Los gewoelde grond wordt via de eerder genoemde pijpleidingen afgevoerd. De ruimte onder het caisson wordt op druk gehouden om te voorkomen dat er grondwater in het caisson loopt. Hierdoor is het mogelijk voor arbeiders



Figuur 12: Caisson [3]

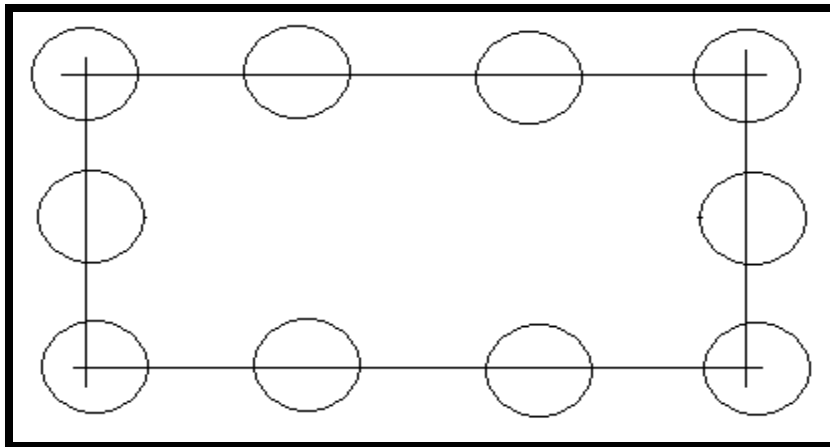
om werk te verrichten in het caisson. Een van de zaken die arbeiders hier kunnen doen is het verkleinen van brokstukken grond zodat deze afgevoerd kunnen worden. Verder kunnen zij reparaties uitvoeren aan het caisson of de daarbij horende apparatuur.

Wanneer het caisson voldoende is afgezonken, worden alle voorzieningen (elektriciteit, afvoerbuizen etc.) verwijderd en wordt het caisson volgestort met beton. Hierna kan er worden begonnen met de opbouw van de constructie.

De caisson fundering is een complexe manier van funderen. Het werken met overdruk en de uithaling van grond onder het caisson en de voorzieningen die nodig zijn om vanuit het caisson te werken zorgen voor deze complexiteit. Dit alles maakt deze methode lastig implementeerbaar binnen defensie. Een simpelere vorm van een caissonfundering is de puttenfundering. Een puttenfundering is een funderingstechniek die gebruikt wordt wanneer de draagkrachtige laag te diep zit voor een fundering op staal maar niet diep genoeg om een paalfundering te rechtvaardigen. Door het plaatsen van (vaak betonnen) putten op de cruciale plaatsen onder een constructie wordt er een fundering gecreëerd zonder dat daar veel graafwerk voor dient plaats te vinden. Op de putten worden gewapende betonnen balken geplaatst om de belasting van de muren naar de putten door te geven.

Als putten wordt gebruik gemaakt van een niet massieve constructie (bijvoorbeeld ringen) die wanneer de bovenliggende constructie dit vereist volgestort kunnen worden met beton of wanneer de draagkracht van de putten zelf voldoende is, met zand of ander opvullingmateriaal.

In onderstaande figuur is een vorm van een puttenfundering geïllustreerd.

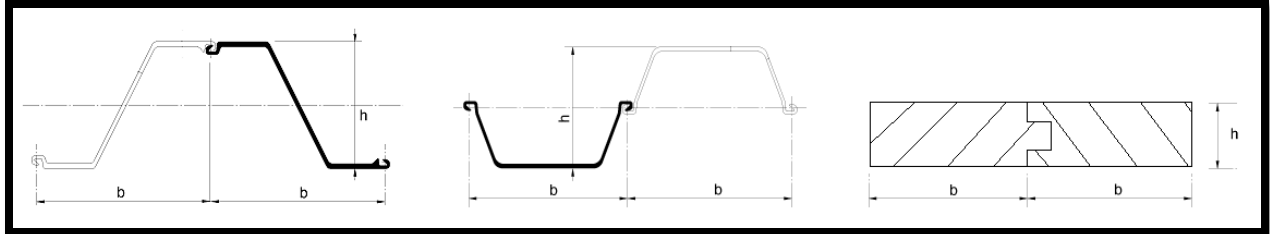


Figuur 13: Bovenaanzicht puttenfundering

Omdat de putten ingegraven dienen te worden zal er een vorm van bronbemaling nodig zijn om de grondwaterspiegel tot onder het aangrijpingspunt van de putten op een draagkrachtige laag vast te houden. De puttenfundering alleen is dus geen oplossing voor een pijlerfundering in een rivier. Een combinatie met een andere methode is wel degelijk mogelijk. Door bijvoorbeeld een damwandkuip te trillen kan binnen deze kuip het water worden weggepompt waarna de graafwerkzaamheden om de putten te plaatsen kunnen beginnen.

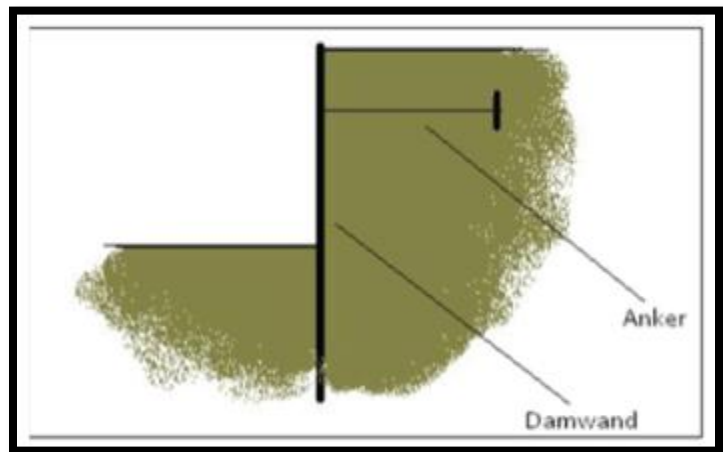
3.2.2 Damwandkuip

Een damwand is een grondkerende constructie, die bestaat uit een verticaal in de grond geplaatste wand. De wand bestaat uit losse elementen (planken) die op een bepaalde manier (onder andere afhankelijk van het materiaal) met elkaar zijn verbonden. Figuur 13 geeft een illustratie van dergelijke verbindingen.



Figuur 13: Damwand verbindingen

Door het gebruik van dunne materialen, is een damwand per definitie een flexibele constructie. Wanneer de gronddruk op deze constructie erg groot is zal de damwand dan ook vervormen en uiteindelijk bezwijken. Bij toepassing als grondkerende constructie zal dan ook vaak een verankering nodig zijn. Dit gebeurt door een ankerstaaf met daaraan een ankerplaat te bevestigen. In plaats van



een ankerplaat wordt er soms gekozen voor *Figuur 14: Damwandconstructie [3]*

een groutanker. Onder hoge druk wordt er dan aan het uiteinde van de ankerstaaf een speciaal soort beton gespoten. Hierdoor ontstaat om het uiteinde van de ankerstaaf een klomp beton.

Om de damwand een grotere stijfheid te geven wordt deze voorzien van een horizontale gording die verschillende delen aan elkaar bevestigt. Damwanden worden in de grond gebracht door gebruik te maken van heien, trillen of drukken. Vanwege deze manier van aanbrengen in combinatie met de flexibele constructie van de damwand vraagt om een grond waar de damwand relatief gemakkelijk in getrild kan worden. Een harde ondergrond kan er namelijk voor zorgen dat de damwand krom trekt tijdens het trillen of heien. Om tijdens deze werkzaamheden schade aan de damwanden te voorkomen worden deze aan de bovenzijde voorzien van een deksloof.

Ook bij deze bouwmethode speelt de diepte van het water een grote rol. Wanneer de damwanden een grote waterdruk te verduren krijgen is het mogelijk dat de damwandkuip instabiel wordt en bezwijkt. Verder is het zaak dat er een draagkrachtige bodem is. Dit ook in verband met de beperkte diepte die je met deze bouwmethode kan bereiken. Al met al is dit een geschikte methode om een droge bouwput te creëren waarbinnen één van de andere funderingstechnieken toegepast kunnen worden, maar is de omgeving bepalend voor de toepasbaarheid.

3.2.3 Fundering op palen

Wanneer de draagkrachtige laag van de grond te diep ligt voor een fundering op staal, wordt er vaak gekozen voor een fundering op palen. Via deze palen worden de krachten vanuit de constructie overgebracht op de ondergrond.

Een funderingspaal ontleent zijn draagkracht aan de volgende 2 verschijnselen:

1. Puntweerstand aan de voet van de paal. Deze wordt bepaald door de gemiddelde drukspanning van de grond, over een gebied van 8x de paalmaat boven de paalpunt en 4x onder de punt, te vermenigvuldigen met het oppervlak van de paalvoet.
2. Schachtwrijving langs de schacht van de paal. De om de paal liggende grond oefent een wrijvingskracht uit langs het, tussen de paalkop en de paalvoet liggende deel van de paal. Deze wrijvingskracht kan in verschillende lagen van de grond verschillende waarden aannemen. De totale schachtwrijving is dan de som van deze verschillende wrijvingskrachten langs de paalschacht. Deze totale (naar boven gerichte) schachtwrijving wordt positieve kleef genoemd. De schachtwrijving langs de paal kan ook neerwaarts gericht zijn. Wanneer de bovenliggende grondlagen gaan zetten, zal de grond aan de paal gaan hangen. Dit is erg ongunstig: niet alleen is er een extra belasting op de paal, ook de bestaande schachtwrijving wordt aangevreten. Dit wordt negatieve kleef genoemd.

De totale draagkracht van een funderingspaal bedraagt dus:

Draagkracht = puntweerstand + schachtweerstand - negatieve kleef

In het verleden werd vaak gebruik gemaakt van houten funderingspalen. Deze zijn gemakkelijk te fabriceren maar kunnen maar een relatief kleine belasting aan. Verder speelt rotting van het hout een grote rol bij het gebruik van dergelijke palen. Houten palen moeten volledig onder de grondwaterspiegel worden geplaatst om deze rotting te voorkomen. Tegenwoordig worden er nauwelijks nog houten palen gebruikt. Wanneer dit wel het geval is wordt vaak een betonnen opzet stuk gebruikt voor het gedeelte van de paal dat zich boven de grondwaterspiegel bevindt.

Een ander materiaal wat gebruikt wordt is staal. Staal kan wel grotere lasten dragen maar heeft weer andere nadelen. Corrosie zorgt voor aantasting van de paal waardoor de draagkracht sterk af kan nemen. Een ander nadeel is het genereren van vele trillingen en het daarbij horende hoge lawaainiveau als gevolg van het heien van stalen palen.

Door de hoge sterkte en laag risico op aantasting is beton het veruit meest gebruikte materiaal voor funderingspalen. Betonnen funderingspalen kunnen geprefabriceerd op de bouwlocatie geleverd worden, of in situ worden gestort. Wanneer een paal in situ wordt gevormd, wordt gebruik gemaakt van een stalen buis die de grond in geslagen of getrild wordt. Deze wordt vervolgens voorzien van wapening en volgestort met beton. De buis kan in de grond worden achtergelaten of tijdens het storten omhoog worden getrokken waarbij alleen de paalpunt achterblijft.

Het voordeel van geprefabriceerde palen is de gecontroleerde omgeving waarin deze palen worden gemaakt. Hierdoor kan de kwaliteit van de palen worden gegarandeerd.

Funderingspalen kunnen op de volgende manier worden aangebracht:

a) 1 Grondverdringend (Heien, trillen)

De grond onder de paal wordt verdrongen door de paal in de grond te slaan door middel van een hei of trilblok. Hierdoor ontstaan grote trillingen die voor de omgeving geluids- of trillingsoverlast kan veroorzaken.

2 Weinig grondverdringend (heien, trillen)

Door het gebruik van slanke palen wordt er minder grond verdrongen waardoor er ook minder trillingen ontstaan. Slanke palen hebben echter wel een kleinere draagkracht.

b) Uithaling van grond (boren, pulsen, knijpen)

Om trillingen helemaal te voorkomen word soms voor deze methode gekozen. De grond onder de paal wordt verwijderd alvorens de paal de grond in te duwen.

Bij paalfunderingen zijn er weinig beperkingen met betrekking tot toepassing. Er is echter wel een grote mate van kennis en materieel voor vereist. Hierdoor zal er verder onderzoek naar de mogelijkheden en onmogelijkheden nodig zijn om te kunnen bepalen of deze bouwmethode geschikt is of kan zijn voor defensie in het algemeen en de genie in het bijzonder.

3.2.4 Beïnvloeden van het waterpeil

Bij de tot nu toe besproken bouwmethoden was voornamelijk het waterpeil van invloed op de toepassing. Bij kleinschalige projecten in kleine riviertjes is het wellicht mogelijk om tijdelijk op kunstmatige wijze het waterpeil te doen dalen. Op deze manier kan er in een relatief droge bouwput gewerkt worden aan een fundering op staal dan wel op palen.

Een indirecte manier op het waterpeil te beïnvloeden is het verhogen van de rivierbedding. Wederom alleen van toepassing bij kleinschalige projecten. Wanneer er beschikking is over voldoende grond kan men een eilandje in de rivier creëren waardoor het mogelijk is om op een droge manier een fundering construeren.

Beide methoden kunnen ook als voorbereiding op een eerder besproken bouwmethoden gebruikt worden. Door het waterpeil te beïnvloeden kan het afzinken van een caisson bijvoorbeeld vereenvoudigd worden of het ingraven van een puttenfundering mogelijk gemaakt worden.

3.3 Conclusie

In het voorgaande hoofdstuk zijn de mogelijkheden voor pijlerbouw binnen de genie besproken en vervolgens de civiel gebruikte methoden aangehaald.

Al snel werd duidelijk dat binnen de genie er kennis en materieel aanwezig is om pijlers te bouwen. Dit kan zowel met geprefabriceerde onderdelen (Bailey, Mabey & Johnson) als door middel van geïmproviseerde constructies (stapellichamen, jukken en/of schragen etc.). Er is echter een gebrek aan kennis en mogelijkheden met betrekking tot het funderen van brugpijlers. Al met al kunnen de volgende conclusies getrokken worden.

- Kennis en materieel voor de bouw van brugpijlers is aanwezig binnen de genie.
 - Drijvende pijlers
 - Bailey, Mabey & Johnson
 - Geïmproviseerd
- De fundering op staal is de enige gebruikte funderingstechniek van funderen.
- Er is (gedateerde) kennis aanwezig over het funderen op palen

Met betrekking tot de civiel gebruikte bouwmethodes bleken er een aantal bouwmethoden naar voren te komen.

- *Caissonfundering*

Bleek een goede manier om een fundering in een rivier te construeren. De specialistische kennis en materieel zorgt er echter voor dat de implementatie bij defensie erg complex is. De puttenfundering biedt wel mogelijkheden vanwege het eenvoudiger karakter van deze techniek. Kanttekening hierbij is dat zonder een manier waarop het waterpeil geconditioneerd kan worden, deze funderingstechniek niet toegepast kan worden.
- *Damwandkuip*

Een geschikte methode om een droge bouwput te creëren waarbinnen één van de andere funderingstechnieken toegepast kunnen worden, maar de omgeving is bepalend voor de toepasbaarheid, dit in verband met de beperkte diepte die bereikt kan worden en het flexibele karakter van de damwand.

- *Paalfundering*

Bij paalfunderingen zijn er weinig beperkingen met betrekking tot toepassing. Er is echter wel een grote mate van kennis en materieel voor vereist. Voordeel bij deze techniek is de in beperkte mate al aanwezige kennis en materieel binnen defensie.

- *Aanpassen van het waterpeil*

Het aanpassen van het waterpeil is een goede oplossing maar alleen toepasbaar bij kleinschalige projecten.

De algemene conclusie die getrokken kan worden is dat er een aantal methoden zijn die zeer zeker interessant zijn voor defensie. De precieze toepassing maar met name de implementatie van de verschillende technieken zal verder onderzocht moeten worden om een onderbouwde keuze te kunnen maken. Verder is er gebleken dat combinaties van verschillende technieken mogelijk zijn. Dergelijke combinaties zorgen er voor dat de technieken in vele situaties toegepast kunnen worden. Er zal dus uitgezocht moeten worden wat de precieze doelstellingen van de Genie zijn met betrekking tot pijlerbouw in rivieren. Hieruit kan vervolgens afgeleid worden welke combinaties gewenst zijn.

4 Case study

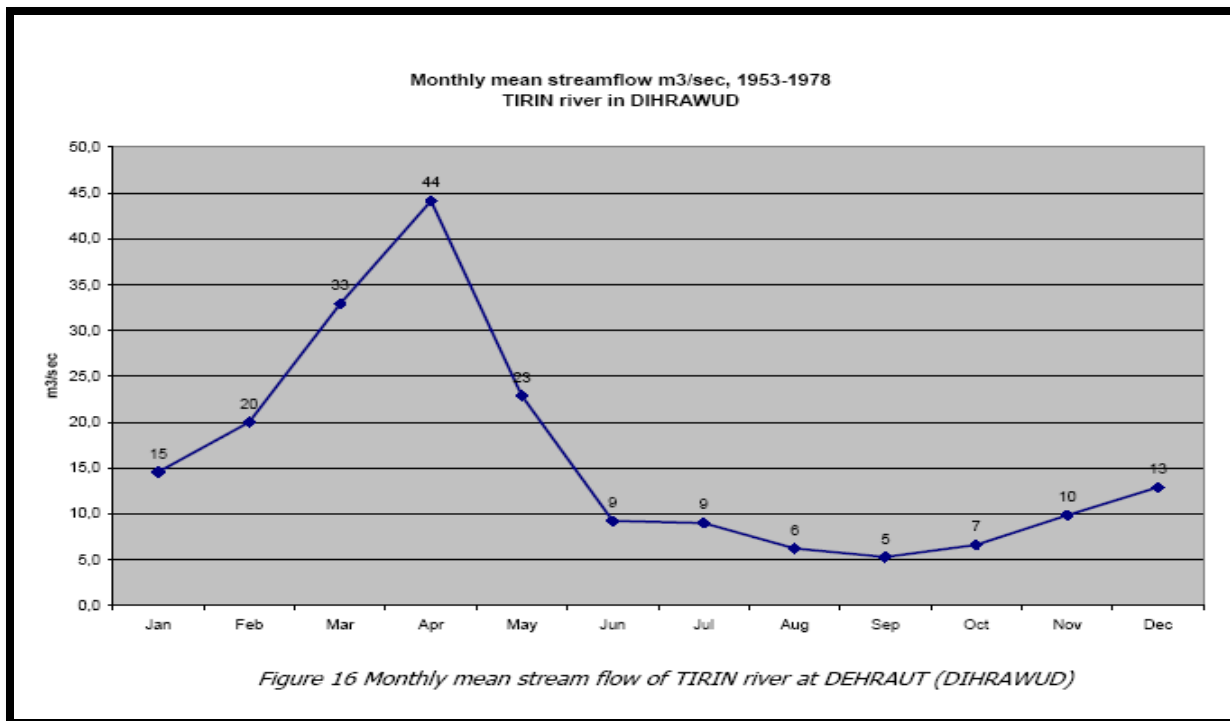
Om een goed beeld te krijgen van de mate van invloed van de geanalyseerde factoren wordt er in het volgende hoofdstuk een case study uitgevoerd. De case is een brug ontworpen door een Pakistaanse ingenieur die gebouwd is in de Tirin rivier ten Noorden van DehRawod in het zuiden van Uruzgan (Afghanistan). Als eerste zal de rivier de Tirin nader besproken worden, vervolgens het ontwerp van de brug geanalyseerd om uiteindelijk de verschillende factoren van invloed te 'toetsen' aan het ontwerp.

4.1 Tirin rivier

In Uruzgan zijn er drie grote rivieren. De Helmand, de Tirin en de minder bekende Kamisan (Duratsan). De Tirin stroomt van het oosten naar het westen. In het Noordoosten van Khas Uruzgan komt de rivier Uruzgan binnen om ten Noord Westen van de plaats DehRawod over te gaan in de Helmand. De bedding van de Tirin bestaat, naast een dikke laag slib, uit gravel en stenen. Verder wordt de Tirin gekenmerkt door een groot verschil in debiet (en daarmee de afmetingen van de rivier) gedurende het jaar. Periodes waarin grote debieten voorkomen zijn december tot april door overvloedige neerslag en maart tot juni door smeltwater uit de bergen. De oevers van de rivier is voor het grootste deel laag en vlak. In de buurt van grotere plaatsen komen soms wat hogere oevers voor met rotsen van 2-4 m hoog.

4.1.1 Parameters

Zoals eerder vermeld is het debiet van de Tirin sterk afhankelijk van de periode waarin deze gemeten wordt. Omdat het in dit document om ontwerp parameters gaat zal het maximum debiet maatgevend zijn en zal deze dan ook gebruikt worden in het vervolg van dit onderzoek. In grafiek 1 op de volgende pagina staan gegevens over het gemiddelde debiet van de Tirin tussen 1953 en 1978.



Grafiek 1: Debiet gegevens Tirin rivier

Uit grafiek 1 is duidelijk af te leiden dat het maximum debiet in de periode 1953 tot 1978 een waarde heeft van 44 m³/s. Omdat het hier gaat om gedateerde en gemiddelde gegevens zal in het vervolg van dit document het debiet naar boven op een tiental worden afgerond op 50 m³/s.

In onderstaande tabel worden de afmetingen van de belangrijkste rivieren in Uruzgan weergegeven.

Name	Location	Width (m) max()	Depth (m) max()	Currents (m/s)	Flood risk	Reservoir lake
HELMAND	Above dam	20-50 (summer) 300-400 (500)	2-2,5 (6)	1-1,9	Dec-Apr (precipitation) Mar-Jun (melting snow)	KAJAKI LAKE
	Below dam	100-200	Unknown	Unknown		
TIRIN	TIRIN KOT	40-50 (150)	2	Unknown	Dec-Apr (precipitation) Mar-Jun (melting snow)	
KAMISAN		20-80	1-2	Unknown	Dec-Apr (precipitation) Mar-Jun (melting snow)	
DURATSAN	N of TIRIN KOT	20-80	1-2	Unknown	Dec-Apr (precipitation) Mar-Jun (melting snow)	

Tabel 3: Afmetingen belangrijkste rivieren in Uruzgan

Zoals in de tabel is af te lezen heeft de Tirin een maximale breedte van 150 m en een diepte van 2 m. De diepte blijft bij een verhoging van het debiet gelijk. Dit houdt in dat de breedte van de rivier wordt vergroot naar mate het debiet toeneemt.

$$Q = v \cdot A$$

Waarin:

$$Q = \text{debiet (m}^3/\text{s)}$$

$$v = \text{stroomsnelheid (m/s)}$$

$$A = \text{Stroom oppervlak (A = h} \cdot \text{b) (m}^2\text{)}$$

Bij vele invloedsfactoren is gebleken dat de stroomsnelheid zeer bepalend is. Om veiligheidsredenen moet dus rekening gehouden worden met een grote stroomsnelheid. De stroomsnelheid is maximaal bij een groot debiet een kleine breedte van de rivier. Omdat het verband tussen het debiet en de breedte van de rivier niet bekend is wordt uitgegaan van de meest ongunstigste situatie, een minimale breedte en het maximale debiet.

$$Q = 50 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$A = 40 \cdot 2 = 80 \text{ m}^2$$

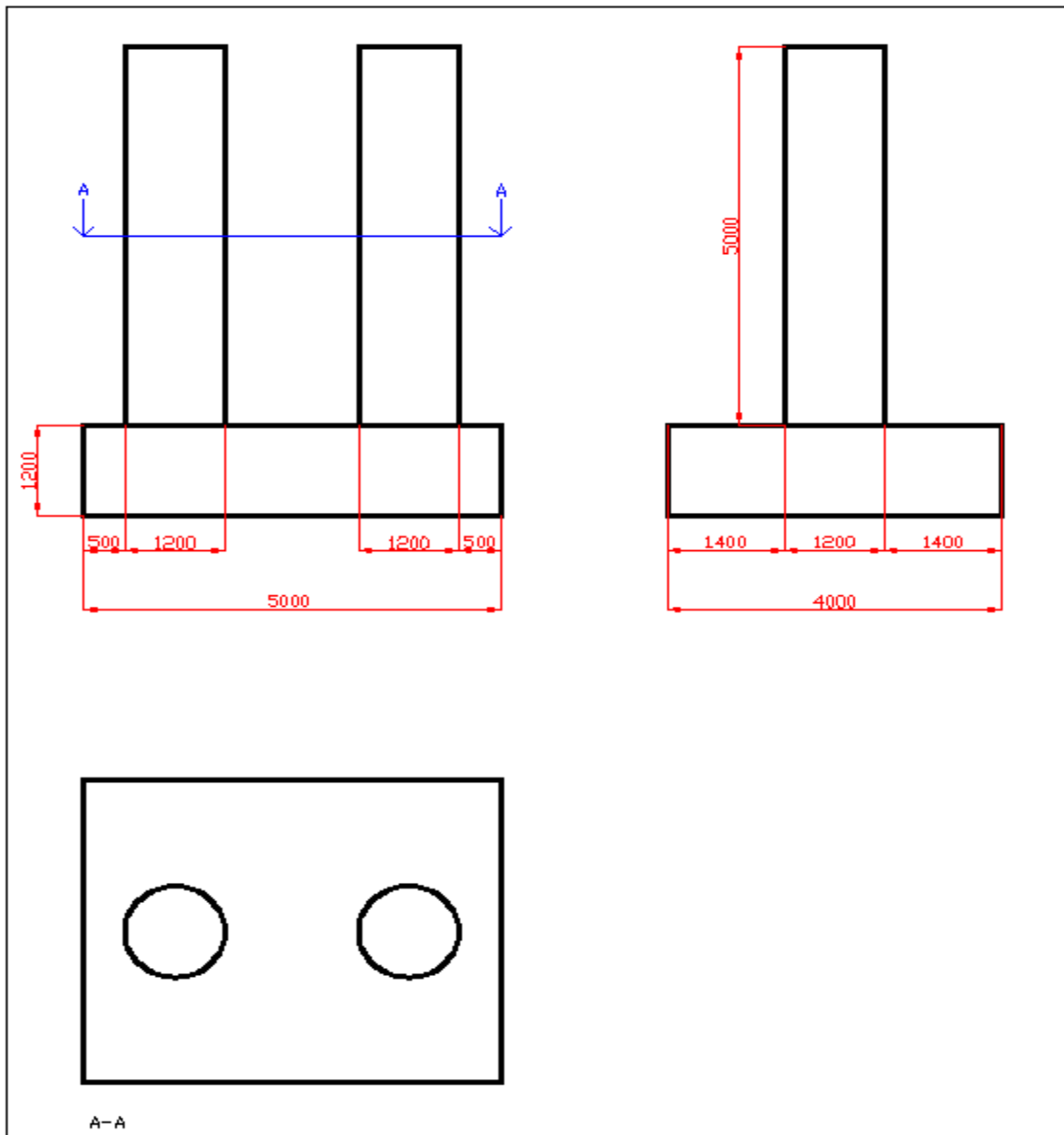
$$Q = v \cdot A$$

$$50 = v \cdot 80$$

$$v = \underline{0.625 \text{ m/s}}$$

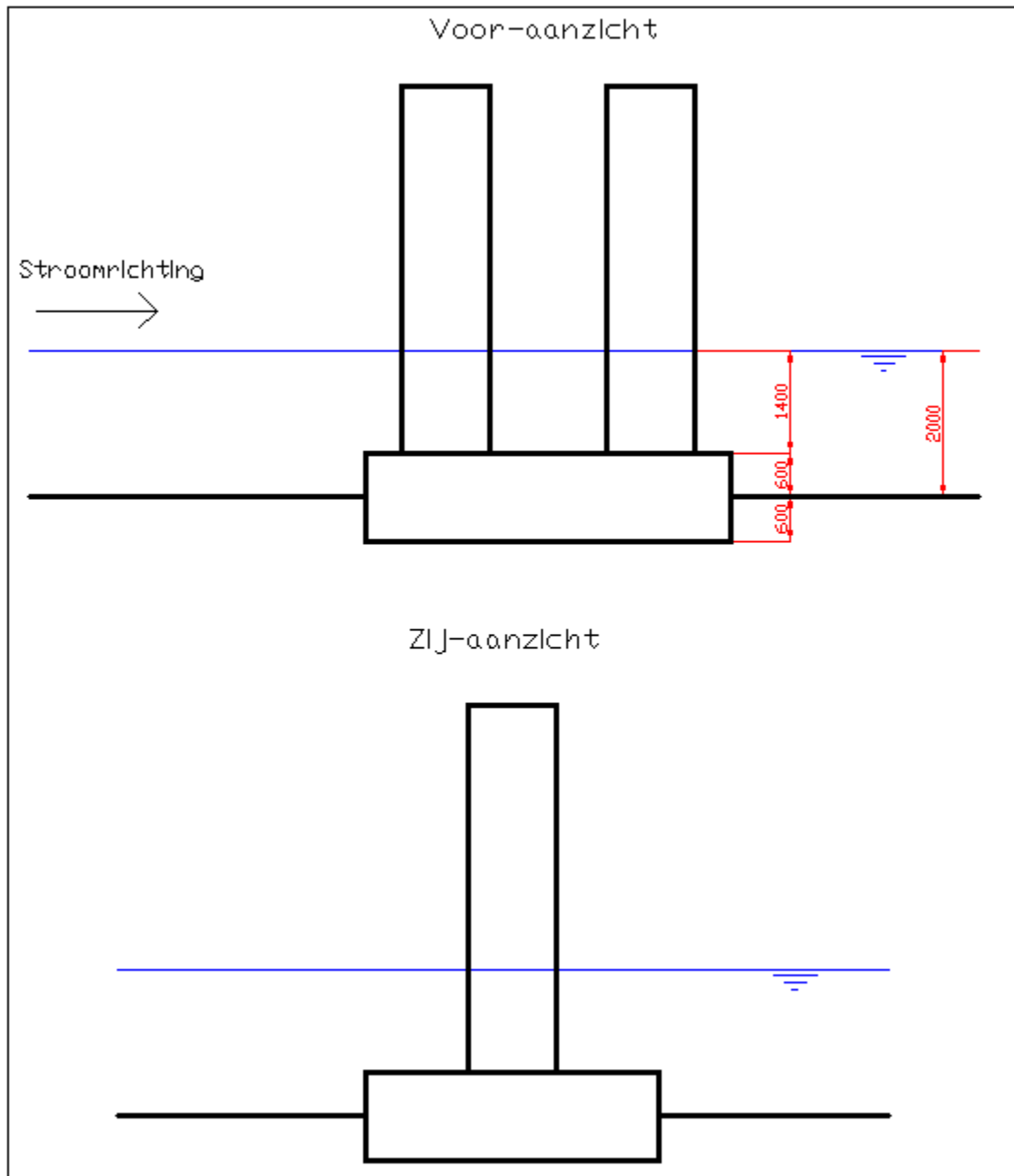
4.2 Taliban bridge

De Talibanbridge is een brug over de Tirin rivier ontworpen door een Zwitsers ingenieursbureau. De brug is een plaatbrug met een aantal betonnen pijlers bestaande uit twee kolommen op een massief betonnen blok als pijlervoet. De Talibanbridge wordt ondersteund door een achttal pijlers. Omdat de acht pijlers op een vergelijkbare manier zullen reageren op belastingen zal in deze case study gebruik gemaakt worden van een plaatbrug ondersteund door een enkele pijler. Het ontwerp van de pijlerconstructie zal gebruikt worden om de factoren van invloed te toetsen. Het ontwerp van de pijler ziet er als volgt uit:



Figuur 14: Pijler TalibanBridge

Zowel de kolommen als massieve pijlervoet worden belast door de stroming van de rivier. De oppervlakte van beide constructie onderdelen speelt dus een rol met betrekking tot de stuwkracht van het water. Uitgangspunt in deze case study worden in onderstaande tekening geschematiseerd:



Figuur 15: Situatietekening pijler

4.3 Mechanica model

Bij het toetsen van de factoren van invloed aan het eerder geschetste ontwerp, zal het ontwerp getoetst worden op sterkte, stijfheid en stabiliteit met betrekking tot de belasting op de pijler. Hiervoor is het nodig om de brug (de pijler in het bijzonder) te schematiseren tot een representatief mechanica model. In dit hoofdstuk zal dit proces uiteen worden gezet.

4.3.1 Randvoorwaarden


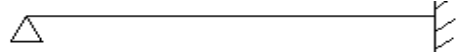
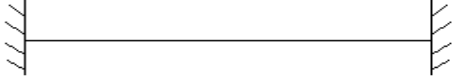
Omdat niet alle gegevens van de brug bekend zijn zullen er randvoorwaarden moeten worden geschetst waarbinnen het ontwerp getoetst wordt. Hierbij kan gedacht worden aan de soorten belasting die een rol spelen en de aansluiting van de pijler(s) op zowel de fundering als op het brugdek.

Brugdek

Over het gebruikte brugdek zijn geen gegevens bekend. Het is belangrijk om de dimensies van het brugdek te bepalen in verband met het gewicht van deze constructie wat weer als permanente belasting op de landhoofden en de pijler fungeert. Vanwege de eenvoud wordt in deze case study een plaatbrug constructie gebruikt. Het brugdek bestaat daarom enkel uit een betonnen plaat die aan beide oevers is opgelegd. De dimensies van deze plaat kunnen aan de hand van de dimensies van de pijler constructie en het gebruik van vuistregels bepaald worden.

De breedte van de rivier is gesteld op 40 m. Bij het gebruik van slechts één pijler betekent dit dat de brug een overspanning kent van 20 m. Het brugdek bestaat uit een enkele plaat waardoor er een toevallige inklemming ontstaat ter hoogte van de pijlerconstructie. De landhoofden kunnen geschematiseerd worden als opleggingen. Waarbij een van de landhoofden een rollende oplegging is om zettingen van het brugdek door temperatuurverschillen of extreme belastingen op te kunnen vangen.

Bij het dimensioneren van het brugdek kan deze dus vereenvoudigd worden tot een enkelzijdig ingeklemde vloer. Uit onderstaande tabel kan vervolgens de bij behorende vuistregel afgeleid worden.

<i>Schema</i>	$\frac{l}{d} \ (l \leq 7,0 \text{ m})$	$\frac{l}{d} \ (l > 7,0 \text{ m})$
	25	$175 / l$
	32	$225 / l$
	35	$245 / l$

Tabel 4: Vuistregels dimensionering vloeren (Sagel, 2004)

De dikte van het brugdek wordt dus:

$$\frac{l}{d} = 225/l \quad \frac{20}{d} = 225/20 = 11,25$$

$$d = 1,8 \text{ m}$$

De pijlervoet heeft een breedte van 5 m. Dit geeft een indicatie dat het brugdek van een soortgelijke breedte zal zijn. Er zal dus met een brugdek met een breedte van 5 m gewerkt gaan worden.

Met een lengte van 40 m, een breedte van 5 m en een dikte van 1,8 m heeft het brugdek een inhoud van 360 m^3 . Het soortelijk gewicht van C20/25 beton is 24 kN/m^3 waardoor de uiteindelijk last 6840 kN is. De helft van deze last wordt gedragen door de twee landhoofden. De andere helft wordt gedragen door de pijlerconstructie. De pijler constructie op zijn beurt bestaat uit twee pijlers die dus elk een kwart van de totale last dragen.

$$F_{\text{pijler}} = \frac{6840}{4} = 1710 \text{ kN}$$

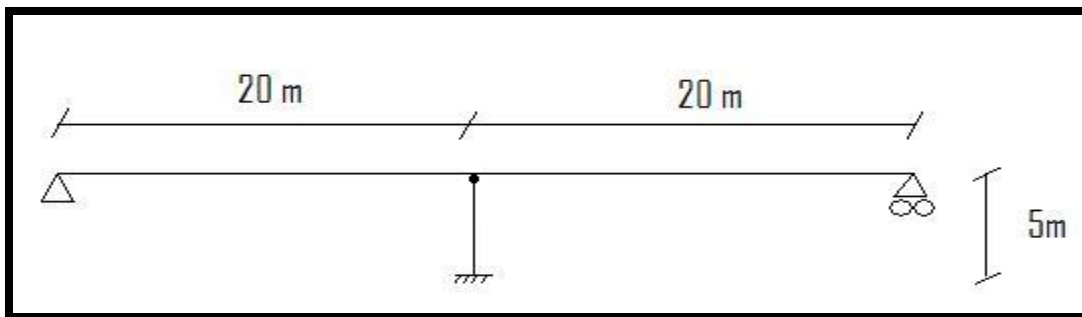
Pijler

Uit de tekeningen af te leiden dat de pijlers star (momentvast) zijn verbonden aan de pijlervoet. Dit kan dus als inklemming gezien worden. Een gevolg hiervan is dat de pijler scharnierend verbonden moet zijn met het brugdek. Wanneer dit niet het geval is ontstaan er spanningen in zowel het brugdek als de pijler.

Verder zal er gerekend worden met de stijfheid van een enkele pijler. Bij het berekenen van de normaalkracht op de pijler is hier dan ook rekening mee gehouden. Beide pijlers worden belast met dezelfde krachten waardoor de uitkomsten van de analyse voor beide pijlers in de pijlerconstructie geldt.

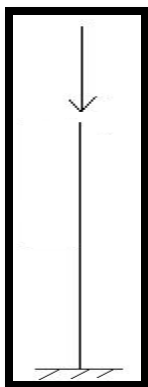
Totaalbeeld

Nu de verschillende onderdelen van de brug zijn besproken kan het totale mechanica model samengesteld worden. In onderstaande figuur wordt dit model weergegeven:



Figuur 16: Mechanica model Talibanbridge

Omdat eerder de belasting van het brugdek berekend is als normaalkracht op de pijler, kan dit model vereenvoudigd worden tot het volgende model.



Figuur 17: Mechanica systeem brugpijler

4.4 Uitwerking Case study

In de volgende paragrafen zullen de eerder in het document geanalyseerde factoren van invloed worden behandeld voor de Taliban bridge in de Tirin rivier. Bij de paragrafen 'Stuwkracht' en 'Windkracht' zal de pijler getoetst worden op sterkte, stijfheid en stabiliteit.

4.4.1 Stuwkracht

De stuwkracht die een willekeurig lichaam in een stroom ondervindt is gedefinieerd als:

$$F = C_d \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A$$

Waarin:

F = De ondervonden stuwkracht (N)

A = Het aangestroomde oppervlak (het oppervlak haaks geprojecteerd op de stroming) (m^2)

ρ = De soortelijke massa van water (kg/m^3)

v = De stroomsnelheid van het water (m/s)

C_d = Weerstandscoefficiënt (dimensieloos)

Omdat de pijler uit twee verschillende vormen bestaan, zal de pijler worden opgesplitst in enerzijds de pijlervoet en anderzijds de kolom die zich op de pijlervoet bevindt.

De oppervlakten die gebruikt gaan worden voor het berekenen van de stuwkracht worden hierdoor als volgt gedefinieerd:.

	Vorm	Oppervlakte (loodrecht op de stroming)
Pijler	Cilinder	$(\frac{1}{2} \times 2 \times \pi \times 600) \times 1400 = 2,64 \text{ m}^2$
Pijlervoet	Balk	$4000 \times 600 = 2400000 \text{ mm}^2 = 2,4 \text{ m}^2$

Pijler

$$F = C_d \cdot \frac{1}{2} \cdot 1000 \cdot 0,625^2 \cdot 1,32$$

Om een schatting te kunnen maken van de weerstandscoefficiënt, dient het getal van Reynolds bepaald te worden.

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot L}{\eta}$$

$$\rho = 1000 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

$$V = 0,625 \text{ (m/s)}$$

$$L = 40 + 2 + 2 = 44 \text{ (m)}$$

$$\eta = 1,01 \cdot 10^{-3} \text{ (kg/m} \cdot \text{s)}$$

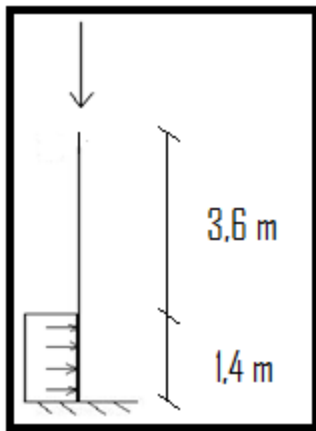
$$Re = \frac{1000 \cdot 0,625 \cdot 44}{1,01 \cdot 10^{-3}} = 27 \cdot 10^6 \quad \rightarrow \quad C_d(\text{cilinder}) \approx 1,0$$

De stuwkracht op de pijler wordt dus:

$$F = 1,0 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1000 \cdot 0,625^2 \cdot 2,64$$

$$F = 515,6 \text{ N} \quad \rightarrow \quad q = \frac{515,6}{2,64} = 195 \text{ N/m}^2$$

Wanneer de pijler een plat oppervlak heeft zorgt voor een grotere weerstandscoefficiënt. Bij een rechthoekige pijler wordt deze namelijk 2,0. Dit betekent dat in dat geval de stuwkracht zal verdubbelen. De omtrek van de pijler is $2 \cdot \pi \cdot r$, waardoor er uiteindelijk sprake is van de volgende verdeelde belasting op de pijler.



$$q = 195 \cdot \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r$$

$$q = 195 \cdot \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,6 = 368 \text{ N/m}$$

Figuur 18: Mechanica model pijler met betrekking tot de stuwkracht

Als laatste zorgt het brugdek nog voor een permanente normaalkracht op de pijler. In figuur 17 is deze normaalkracht al geschematiseerd

Controle sterkte

Bij de controle van de sterkte van de pijler wordt het maximaal toelaatbare moment vergeleken met het aanwezige moment. Wanneer het maximaal toelaatbare moment niet wordt overschreden, is de pijler sterk genoeg om de belasting te kunnen dragen/overdragen. Vanwege het veranderlijke karakter van de windbelasting wordt er gewerkt met een veiligheidsfactor van 1,5.

$$\frac{M_{\text{toelaatbaar}}}{M_{\text{aanwezig}}} \geq 1,5$$

Het toelaatbare moment is te bepalen aan de hand van het wapeningspercentage en de afmetingen van de pijler.

$$\frac{M}{b \cdot d^2} = ?$$

Uit deze berekening komt een bepaalde waarde. Aan de hand van de tabel die in bijlage 1 te vinden is kan dan het bij behorende wapeningspercentage afgelezen worden.

In de case study wordt uitgegaan het wapeningstaal FeB500. Bij deze staalsoort hoort een wapeningspercentage dat zich tussen de 0,15 en de 1,38 bevindt. Dit geeft een gemiddeld percentage van ongeveer 0,75%. De waarde van $\frac{M}{b \cdot d^2}$ behorende bij dit percentage is 2900. Dit resulteert in een maximaal toelaatbaar moment van:

$$\frac{M}{0,6 \cdot 0,6^2} = 2900 \quad \rightarrow \quad M = 626 \text{ kNm}$$

Het maximale moment in de pijler is 0,5 kNm De volledige berekening hiervan kunt u terugvinden in bijlage 2.

$$\frac{M_{\text{toelaatbaar}}}{M_{\text{aanwezig}}} \geq 1,5 \quad \rightarrow \quad \frac{626}{0,5} = 1252 \gg 1,5$$

Het maximaal toelaatbaar moment wordt niet overschreden. Het aanwezige moment is slechts 0,5 kNm. De reden voor dit kleine moment als gevolg van de stuwkracht is met name de lage snelheid van het water. Met een snelheid van 0,625 m/s veroorzaakt het water een matige stuwkracht. Het maximale moment dat in de pijler aanwezig mag zijn is als volgt te berekenen.

$$\frac{M_{\text{toelaatbaar}}}{M_{\text{aanwezig}}} \geq 1,5 \quad \rightarrow \quad \frac{626}{x} = 1,5 \quad \rightarrow \quad x = \frac{626}{1,5} = 417 \text{ kNm}$$

Het moment van 417 kNm kan bereikt worden wanneer het waterpeil stijgt maar met name wanneer de snelheid van het water toeneemt.

Wanneer het water tot aan het brugdek stijgt, neemt de stuwkracht als gevolg van het aangestroomde oppervlak dat vergroot is, toe tot maximaal 1,8 kN wat resulteert in een maximaal moment van 4,6 kNm.

Wanneer de snelheid van het water echter stijgt, neemt de stuwkracht kwadratisch evenredig toe. Om het maximale moment te overschrijden dient de snelheid toe te nemen tot ruim 21 m/s of 76 km/h. Deze snelheid zal het water niet snel bereiken.

De derde mogelijkheid is dat het water stijgt en daarbij ook de stroomsnelheid toe neemt. Wanneer het water tot het brugdek stijgt, mag de snelheid van het water tot maximaal 5,9 m/s of 21 km/h toe nemen zonder dat de sterkte van de pijler in gevaar komt. Deze snelheid komt niet vaak voor bij grote rivieren. Rivieren als de Rijn of de Maas kent stroomsnelheden van 1 á 2 m/s. Kleinere stroompjes kunnen gemakkelijker dergelijke snelheden halen.

De volledige berekeningen die tot deze conclusies hebben geleid vindt u in bijlage 3.

Het moment in de pijler wordt met name opgenomen door de aanwezige wapening. Wanneer de kwaliteit van het wapeningsstaal niet gewaarborgd kan worden kunnen er problemen ontstaan met betrekking de sterkte eis. In dit geval is gebleken dat het moment in de pijler dusdanig klein is dat hier geen sprake van is. Wanneer er redelijke wijs aan te nemen is dat de kwaliteit van wapening te wensen over laat kan er voor gekozen worden om dit betonstaal te testen. Door het staal in een trekbank te belasten kan de vloeigrens bepaald worden. De spanning die bij deze vloeigrens hoort kan vergeleken worden met betonstaal naar Nederlandse normen. FeB500 heeft bijvoorbeeld een vloeigrens bij 500 N/mm². In de tabel in bijlage 1 staan de gegevens van de betonstalen FeB220, FeB400 en FeB500. Wanneer blijkt dat de vloeigrens nog lager ligt dan FeB220 zal er handmatig berekend moeten worden wat de toelaatbare trekspanning in het beton is.

Globale wapeningsberekening:
$$A_s = \frac{M_d}{f_s \cdot 0,9 \cdot d}$$

Waarin:

$$A_s = \text{Hoeveelheid wapening (mm}^2\text{)}$$

$$M_d = \text{Moment in desbetreffende doorsnede (Nmm)}$$

$$f_s = \text{vloeigrens wapeningstaal (N/mm}^2\text{)}$$

$$d = \text{Nuttige hoogte van de doorsnede (mm)}$$

Hierbij moet er voor worden zorg gedragen dat het wapeningstaal gaat vloeien voor dat de druksterkte van het beton (in de drukzone) wordt overschreden.

Controle stijfheid

De belasting van de stuwkracht mag er niet voor zorgen dat de pijler te veel doorbuigt. Daarvoor moet er een controle uitgevoerd worden of de stijfheid van de pijler voldoende is om de belasting aan te kunnen. De eis aan stijfheid voor vloeren is gesteld als:

$$u \leq 0,004 \cdot l$$

Waarin: $u = \text{maximale verplaatsing}$

$$l = \text{lengte van de overspanning}$$

De lengte van de pijler is 5 m, dus de maximale verplaatsing moet kleiner of gelijk zijn aan:

$$0,004 \cdot 5000 = 20 \text{ mm}$$

Vanwege de complexiteit van de berekening wordt de situatie vereenvoudigd. Wanneer het water stijgt maar de stroomsnelheid gelijk blijft zal de verdeelde belasting van de stuwkracht doorgetrokken worden over de volledige lengte van de pijler. Dit levert een ongunstigere situatie op. Met dit gegeven kan de maximale doorbuiging berekend worden (zie bijlage 2). Bij deze ongunstige situatie hoort een maximale verplaatsing van 0,05 mm. Dus de stijfheid van de pijler komt geenszins in gevaar.

Omdat de betonkwaliteit in in dit geval Afghanistan niet aan dezelfde kwaliteitseisen voldoet zoals dat in Nederland wel het geval is, is gerekend met eigenschappen van gescheurd beton. De gebruikte elasticiteit modulus is daarom met een factor 0,3 vermenigvuldigt. Omdat de eis met betrekking tot de stijfheid van de pijler met deze conservatieve manier van rekenen zelfs met een factor 100 nog niet is overschreden mag er geconcludeerd worden dat er zelfs met deze inferieure betonkwaliteit deze eis geen problemen oplevert. De gebruikte E modulus van beton is $0,3 \cdot 28500 = 8550 \text{ N/mm}^2$.

Controle stabiliteit

Bij de controle van de stabiliteit gaat het om het feit of de pijler niet dusdanig knikt dat de gehele brug onstabiel wordt. De controle die daaraan ten grondslag ligt, ziet er als volgt uit.

$$e_0 = \frac{M_d}{N'_d}$$

$$e_{0,\min/\max} = \frac{1}{300} l \geq 10 \text{ mm}$$

$$M_{d,\min/\max} = 0.1 \cdot h \cdot N'_d \Rightarrow e_0 \geq 0.1h$$

Pendelkolommen:

$$e_t = e_0 + e_c \geq e_0$$

	Vierkante kolommen	ronde kolommen
$e_0 < \frac{1}{2}h$	$e_c = (4.5h + 3e_0) * \left(\frac{l_c}{100h}\right)^2$	$e_c = (4.5h + 6.7e_0) * \left(\frac{l_c}{100h}\right)^2$
$e_0 \geq \frac{1}{2}h$	$e_c = 6h * \left(\frac{l_c}{100h}\right)^2$	$e_c = 7.85h * \left(\frac{l_c}{100h}\right)^2$

De berekeningen zijn terug te vinden in bijlage 2.

$$e_t = 146 \text{ mm}$$

Uit de grafiek in bijlage 4 is af te lezen dat met deze uitwijking er theoretisch geen wapening in de kolom nodig is. Dit wil dus zeggen dat met een wapeningspercentage van 0,75 % de stabiliteit van de pijler niet in gevaar komt.

Pijlervoet

$$Re = \frac{1000 \cdot 0,625 \cdot 44}{1,01 \cdot 10^{-3}} = 27 \cdot 10^6 \quad \rightarrow \quad C_d(\text{balk}) \approx 2,0$$

$$F = 1,0 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1000 \cdot 0,625^2 \cdot 2,4$$

$$F = 937,5 \text{ N} \quad \rightarrow \quad q = \frac{937,5}{2,4} = 390,63 \text{ N/m}^2$$

Omdat de pijlervoet een massiefblok beton zal de stijfheid en stabiliteit van de pijlervoet niet in gevaar komen. De druksterkte van het beton wordt wel beproefd. De stuwkracht is een veranderlijke belasting en zal daardoor verrekend worden met een veiligheidsfactor van 1,5.

$$q = 1,5 \cdot 390,63 = 585,9 \text{ N/m}^2$$

$$q = 59 \cdot 10^{-3} \text{ N/mm}^2$$

De stuwkracht is een factor 1000 kleiner dan de druksterkte van C20/25 beton. De druksterkte van C20/25 beton is namelijk 15 N/mm².

Conclusie

De stuwkracht in deze case heeft nauwelijks invloed op de pijler. Gebleken is dat met name de lage stroomsnelheid van het water er voor zorgt dat de stuwkracht in geen geval de sterkte, stijfheid of stabiliteit van de pijler in gevaar brengt.

Na wat extra berekeningen bleek dat ook bij een toenemende stroomsnelheid én een groter pijleroppervlak er geen gevaren optreden met betrekking tot de pijler. Wel werd er aangetoond dat het potentieel van deze kracht erg groot is. Bij een pijler met een groot oppervlak en een rivier met een hoge stroomsnelheid kan de stuwkracht flink toenemen. Verder werd er geconstateerd dat de berekeningen zijn gebaseerd op materiaal eigenschappen met een Nederlandse kwaliteitsnorm. Deze zal echter in gebieden als Afghanistan niet vaak gehaald worden. Het is dus van belang de berekeningen aan te passen op de materiaal kwaliteit waar mee gewerkt wordt.

4.4.2 Ijs

In Afghanistan zijn er geen problemen bekend met betrekking tot kruidend ijs. Wel heeft men op grote schaal te maken met vuil en puin dat wordt meegevoerd met de stroming. Bij het onderwerp botsing wordt daarop teruggekomen.

4.4.3 Windkracht

Op eenzelfde manier als bij de stuwkracht kan de windkracht op de pijler worden bepaald. Hier komt echter de windkracht op de brug zelf voor een gedeelte bij. De windkracht op het brugdek zal namelijk enerzijds worden opgenomen door de landhoofdconstructies, de rest zal echter door de pijler worden opgenomen. Omdat er geen gegevens zijn over de krachtenoverdracht in de brug zal hier niet verder op worden ingegaan. Omdat de gemiddelde windsnelheid in Afghanistan onbekend is, wordt er uitgegaan van een zeer harde wind. Windkracht 10 wat een windsnelheid inhoudt van +/- 30 m/s (<http://www.knmi.nl>). Verder is de dichtheid van de wind (lucht) afhankelijk van de omgevingstemperatuur. Wanneer de temperatuur laag is, is de dichtheid van lucht groter dan wanneer de temperatuur hoog is. In Afghanistan zijn er temperaturen bekend van + 40°C tot -40°C Bij een temperatuur van 0°C is de dichtheid van lucht 1,29 kg/m³ (= max. luchtdichtheid).

$$F = C_d \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A$$

Waarin:

F = De ondervonden windkracht (N)

A = Het oppervlak waarop de wind invloed heeft (m²)

ρ = De soortelijke massa van lucht = 1,29 kg/m³

v = De windsnelheid = 30 m/s

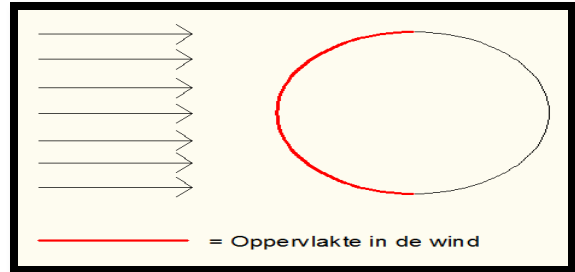
C_d = Weerstandscoefficiënt (dimensieloos)

Het gedeelte van de pijler wat in de wind staat is de cilindervormige kolom. Waarvan alleen het gedeelte boven de waterspiegel in contact staat met de wind. De helft van de cilinder staat in contact met de wind. In figuur 19 wordt dit geïllustreerd. Dit oppervlakte is de halve omtrek van de cilinder maal de hoogte van de cilinder.

$$A = h \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \right)$$

$$A = 3,6 \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,6 \right)$$

$$A = 6,8 \text{ m}^2$$



Figuur 19: Contactvlak pijler-wind

Om een schatting te kunnen maken van de weerstandscoefficiënt, dient het getal van Reynolds bepaald te worden.

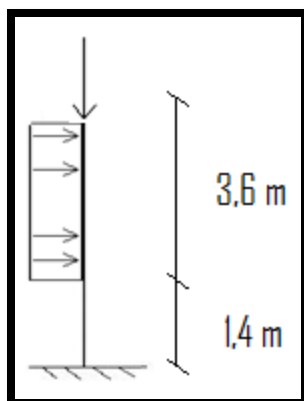
$$Re = \frac{1,29 \cdot 30 \cdot 1,2}{1,72 \cdot 10^{-5}} = 2,7 \cdot 10^6 \quad \rightarrow \quad C_d \approx 1,0$$

De windkracht op de pijler wordt dus:

$$F = 1,0 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,29 \cdot 30^2 \cdot 6,8$$

$$F = 3947 \text{ N} \quad \rightarrow \quad q = \frac{3947}{6,8} = 581 \text{ N/m}^2$$

De omtrek van de pijler is $2 \cdot \pi \cdot r$, waardoor er uiteindelijk sprake is van de volgende verdeelde belasting op de pijler.



$$q = 581 \cdot \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r$$

$$q = 581 \cdot \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,6 = 1095 \text{ N/m}$$

Figuur 20: Mechanica model pijler met betrekking tot de windkracht

Als laatste zorgt het brugdek nog voor een permanente normaalkracht op de pijler. In figuur 18 is deze normaalkracht al geschematiseerd.

Controle sterkte

Bij de controle van de sterkte van de pijler wordt het maximaal toelaatbare moment vergeleken met het aanwezige moment. Wanneer het maximaal toelaatbare moment niet wordt overschreden, is de pijler sterk genoeg om de belasting te kunnen dragen/overdragen. Bij de toetsing moet van de meest ongunstige situatie worden uitgegaan. Daarom wordt er gerekend met een veiligheidsfactor van 1,5.

$$\frac{M_{\text{toelaatbaar}}}{M_{\text{aanwezig}}} \geq 1,5$$

Het toelaatbare moment is te bepalen aan de hand van het wapeningspercentage en de afmetingen van de pijler.

$$\frac{M}{b \cdot d^2} = ?$$

Uit deze berekening komt een bepaalde waarde. Aan de hand van de tabel die in bijlage 1 te vinden is kan dan het bij behorende wapeningspercentage afgelezen worden.

In de case study wordt uitgegaan van het wapeningstaal FeB500. Bij deze staalsoort hoort een wapeningspercentage dat zich tussen de 0,15 en de 1,38 bevindt. Dit geeft een gemiddeld percentage van ongeveer 0,75%. De waarde van $\frac{M}{b \cdot d^2}$ behorende bij dit percentage is 2900. Dit resulteert in een maximaal toelaatbaar moment van:

$$\frac{M}{0,6 \cdot 0,6^2} = 2900 \quad \rightarrow \quad M = 626 \text{ kNm}$$

Het maximaal aanwezige moment in de pijler is 18,4 kNm. De volledige berekening hiervan kunt u terugvinden in bijlage 3.

$$\frac{M_{\text{toelaatbaar}}}{M_{\text{aanwezig}}} \geq 1,5 \quad \rightarrow \quad \frac{626}{18,4} = 34 \gg 1,5$$

Hieruit blijkt dat zelfs bij zeer zware storm de sterkte van de pijler niet in gevaar komt. Het maximale moment dat in de pijler aanwezig mag zijn is als volgt te berekenen.

$$\frac{M_{\text{toelaatbaar}}}{M_{\text{aanwezig}}} \geq 1,5 \quad \rightarrow \quad \frac{626}{x} = 1,5 \quad \rightarrow \quad x = \frac{626}{1,5} = 417 \text{ kNm}$$

Het moment van 417 kNm kan bereikt worden wanneer het oppervlak van de pijler toeneemt of wanneer de windsnelheid toeneemt. De windsnelheid waarmee gerekend is is echter al dusdanig hoog dat het oppervlak van de pijler relevanter is voor het bepalen van de maximale belasting die uitgeoefend mag worden op de pijler. Wanneer er geen water staat in de rivier, wordt de volledige lengte van de pijler belast door de wind. Het oppervlak is dus een stuk groter. Het oppervlak neemt dan toe van 6,8 m² tot 9,4 m². Hierdoor neemt de windkracht toe tot 5,5 kN. Het maximale moment wat hierbij hoort is 20 kNm wat nog steeds een ruime factor 30 kleiner is als het toelaatbare moment.

Controle stijfheid

De belasting van de windkracht mag er niet voor zorgen dat de pijler te veel doorbuigt. Daarvoor moet er een controle uitgevoerd worden of de stijfheid van de pijler voldoende is om de belasting aan te kunnen. De eis aan stijfheid voor vloeren is gesteld als:

$$u \leq 0,004 \cdot l$$

Waarin: $u = \text{maximale doorbuiging}$

$l = \text{lengte van de overspanning}$

De lengte van de pijler is 5 m, dus de maximale doorbuiging moet kleiner of gelijk zijn aan:

$$0,004 \cdot 5000 = 20 \text{ mm}$$

Vanwege de complexiteit van de berekening wordt de situatie vereenvoudigd. In de berekening wordt er vanuit gegaan dat er geen water in de rivier aanwezig is waardoor de wind de volledige lengte van de pijler belast. Hierdoor valt de kracht die de pijler moet dragen groter uit. Bij deze zwaardere belasting heeft de pijler een maximale doorbuiging van 0,15 mm (zie bijlage 3). De maximaal toelaatbare doorbuiging van 20 mm wordt dus zelfs bij deze ongunstige situatie niet overschreden.

Controle stabiliteit

Bij de controle van de stabiliteit gaat het om het feit of de pijler niet dusdanig knikt dat de gehele brug onstabiel wordt. De controle die daaraan ten grondslag ligt, ziet er als volgt uit.

$$e_0 = \frac{M_d}{N'_d}$$

$$e_{0;\min/maal} = \frac{1}{300} l \geq 10 \text{ mm}$$

$$M_{d;\min/maal} = 0.1 \cdot h \cdot N'_d \Rightarrow e_0 \geq 0.1h$$

Pendelkolommen:

$$e_t = e_0 + e_c \geq e_0$$

	Vierkante kolommen	ronde kolommen
$e_0 < \frac{1}{2}h$	$e_c = (4.5h + 3e_0) * \left(\frac{l_c}{100h}\right)^2$	$e_c = (4.5h + 6.7e_0) * \left(\frac{l_c}{100h}\right)^2$
$e_0 \geq \frac{1}{2}h$	$e_c = 6h * \left(\frac{l_c}{100h}\right)^2$	$e_c = 7.85h * \left(\frac{l_c}{100h}\right)^2$

De berekeningen zijn terug te vinden in bijlage 3.

$$e_t = 146 \text{ mm}$$

Uit de grafiek in bijlage 3 is af te lezen dat met deze uitwijking er theoretisch geen wapening in de kolom nodig is. Dit wil dus zeggen dat met een wapeningspercentage van 0,75 % de stabiliteit van de pijler niet in gevaar komt.

4.4.4 Sediment transport

Van de Tirin rivier is bekend dat de rivierbedding bestaat uit een flinke laag slik met daaronder gravel en stenen. Kwantitatieve data zijn niet bekend, deze kunnen dus ook niet gebruikt worden voor het bepalen van de mate van erosie. Ter indicatie zullen de weergegeven formules uit hoofdstuk 2.4 worden ingevuld en uitgerekend.

$$\text{Schoon water erosie: } d_s = 0.00022 \left(\frac{UD_c}{v} \right)^{0.619} \quad (\text{Shen, 1971})$$

$$d_s = 0,95m$$

$$\frac{d_s}{D_c} = 1.35 \left(\frac{h}{D_c} \right)^{0.3} \quad (\text{da Cunha, 1970})$$

$$d_s = 1,88m$$

$$\text{Sediment erosie: } \frac{d_s}{D_c} \approx 2.0 \text{ tot } 2.3 \quad (\text{Shen, 1971})$$

$$d_s \approx 2,4 \text{ tot } 2,76$$

$$\frac{d_s}{D_c} = 1.5 \tan h \left(\frac{h}{D_c} \right) = \quad (\text{Breusers et al, 1977})$$

$$d_s = 0,1m$$

Uit deze uitkomsten blijkt duidelijk dat het probleem van bodem erosie een dusdanig complex proces is dat er geen duidelijke richtlijnen voor zijn. Er zal dus uit voorzorg een van de genoemde oplossingen gebruikt moeten worden om de bodmerosie te voorkomen. Vanwege de eenvoud geniet het gebruik van 'geobags' of andere sedimentverzwarende maatregelen de voorkeur.

4.4.5 Temperatuur verschillen

In heel Afghanistan en dus ook in de omgeving van de Tirin rivier heersen er extremen in temperatuut van + 40°C tot -40°C. Dit zorgt dus voor een temperatuursverschil van 80°C. De gehele brugpijler bestaat uit beton. De volgende situatie doet zich dus voor.

De pijler met een lengte van 5 m ondergaat een temp. verschil van 80 °C.

Temperatuurverhoging: 80 °C

Thermische uitzettingscoëfficiënt: $12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

Per meter zet de pijler uit: $80 \times (12 \times 10^{-6}) = 9,6 \times 10^{-4}$

De pijler is 5 meter hoog, dus de hele pijler zet uit: $5 \times 9,6 \times 10^{-4} = 0,0048\text{m} = 4,8 \text{ mm}$.

Op een pijler van 5 m hoog is dit te verwaarlozen. De stabiliteit van de pijler zal dus niet noemenswaardig beïnvloed worden. Wel moet er rekening gehouden worden met het verschil in temperatuur tussen de omgeving en het water van de rivier. Dit temperatuurverschil kan scheuren in de betondekking veroorzaken waardoor de wapening van de pijler bloot kan komen te liggen. Bij de controle van de scheurwijdte zijn een aantal variabelen die aangepast kunnen worden om de scheurvorming binnen de eisen te houden. De mogelijkheden zijn:

- Dezelfde hoeveelheid wapening, deze wapening echter verzorgen door gebruik te maken van staven met een kleinere doorsnede.
- Meer wapening
- Een grotere betondekking (economisch minder aantrekkelijk)

Bij het gebruik van meer wapening of meer maar kleinere staven is het van belang dat de afstand tussen de staven niet te klein wordt in verband met het storten en verdichten van het beton. Wanneer de afstand te klein is, kan er voor gekozen worden om staven te bundelen of (onder bepaalde voorwaarden) de wapening in verschillende lagen aan te brengen. Krimpwapening (ook wel krimpnet) is een net van wapeningsstaven geproduceerd om krimp te voorkomen. De principes van meer staven en in verschillende lagen is hier dus feitelijk toegepast. Omdat de scheurvorming als gevolg van de schommelende temperaturen moeilijk te bepalen is zal er uit voorzorg krimpwapening gebruikt moeten worden.

4.4.6 Botsingen

Zoals eerder al is besproken (hst 2.7) heeft men in de Tirin rivier veel te maken met meestromend vuil en puin wat forse schade kan toebrengen aan constructie die zich in de stroming bevinden. In de Tirin rivier is er geen sprake van scheepvaart.

In hoofdstuk 2.7 zijn een aantal oplossingen in beeld gekomen. Ten eerste is een alarmsysteem besproken om botsingen te voorkomen. Dit heeft uiteraard alleen nut om aanvaringen te voorkomen. Verder is er gesproken over het plaatsen van beschermingsconstructies. Een aantal zijn er de revue gepasseerd:

- Fenderconstructie
- Geleide rail
- Kreukelzone

Fenderconstructie

Bij het plaatsen van een fenderconstructie worden de krachten die bij een botsing worden overgedragen, opgevangen door deze constructie. Voor de botsing met vuil en puin is dit dus een goede oplossing.

Geleide rail

Ook de geleide rail is de situatie van de Tirin rivier een goede oplossing. Vuil en puin worden om de pijler heen geleid waardoor er geen schade aan de pijler ontstaat.

Kreukelzone

De kreukelzone is in dit geval een minder geschikte oplossing. Een kreukelzone werkt eenmalig waardoor er in het geval van puin in het vervolg geen bescherming van de pijler aanwezig is.

De geleide rail is in dit geval de beste oplossing. Botsingen van puin met de pijler worden voorkomen. Bijkomend voordeel is dat de geleide rail dusdanig geconstrueerd kan worden dat zowel het puin als het water om de pijler heen wordt geleid. Hierdoor worden de stuwkracht van het water en de mate van bodemerosie ook beperkt.

4.4.7 Aardbevingen

In Afghanistan bestaat zoals overal ter wereld de kans op aardbevingen. Afghanistan is echter geen gebied waarvan bekend is dat er regelmatig aardbevingen plaatsvinden. Er ontstaat daardoor een discussie over de keuze om constructie aardbeving bestendig(er) te construeren of het risico op schade door een aardbeving te accepteren.

Wanneer er in deze case study de keuze wordt gemaakt om de brug (en dus ook de pijler) aardbeving bestendig te construeren, zijn er een aantal zaken die aangehaald kunnen worden.

- a) De gehele pijlerconstructie zal zo stijf mogelijk ontworpen dienen te worden. De stijfheid van de constructie moet dusdanig groot zijn dat de natuurlijke trilling van de pijler kleiner is dan de meest voorkomende aardbevingen. De kans op (ernstige) schade wordt dan sterk beperkt. De stijfheid kan worden vergroot door de twee kolommen te verbinden waardoor deze samen een stijver constructie vormen.
- b) De funderingspalen kunnen diagonaal in de bodem worden gebracht. Op deze manier is de funderingsconstructie beter in staat om horizontale krachten die ontstaan bij aardbevingen, op te nemen dan wel over te dragen aan de bodem.
- c) De aansluiting van de pijler op de brug moet ruimte bieden voor de trillingen die ontstaan als gevolg van de aardbeving. Hierdoor worden scheuren voorkomen. Er is gekozen voor een rollende oplegging tussen brug en pijler. Dit impliceert dat de benodigde ruimte aanwezig is om de trillingen te kunnen verwerken.

De kans op aardbevingen is dus gering en de mogelijkheden om de constructie tegen aardbevingen te wapenen zijn duidelijk aanwezig.

4.4.8 Opdrijvende krachten

Het ontwerp bestaat uit een massief betonnen pijler en pijlervoet. Deze constructie is dusdanig zwaar dat er problemen verwacht hoeven te worden met betrekking tot opdrijvende krachten. Hierbij komt dat de krachten die worden veroorzaakt door het gewicht van de brug overgedragen worden op de pijler en deze dus ook de opwaartse kracht van het water tegenwerken. Wanneer er alleen gekeken wordt naar de inhoud van het gedeelte van de pijler dat zich onder water bevindt, ontstaat een situatie die op de volgende pagina wordt beschreven.

De pijler heeft de volgende inhoud:

Constructie onderdeel	Afmetingen (m)	Inhoud (m^3)
Pijlervoet	b = 5 l = 4 h = 0,6	12
Kolom 1	r = 0,6 h = 1,4	3,17
Kolom 2	r = 0,6 h = 1,4	3,17
Totaal		18,34 m^3

Tabel 4: Pijlerinhoud

Het soortelijke gewicht van beton is +/- 2400 kg/m³ waardoor het totale gewicht van het gedeelte van de pijler dat zich onder water bevindt 47684 kg is.

$$F_{\text{gewicht}} = 47684 \cdot 9,81 = 467780 \text{ N} = 467,78 \text{ kN}$$

De oprijvende kracht van het verplaatste water wordt als volgt gedefinieerd:

$$F_{\text{opwaarts}} = g \cdot \rho_{\text{vloeistof}} \cdot V$$

$$F_{\text{opwaarts}} = 9,81 \cdot 1000 \cdot 18,34$$

$$F_{\text{opwaarts}} = 179915,4 \text{ N} = 180 \text{ kN}$$

De opwaartse kracht van het water zal geen enkel probleem veroorzaken. De dichtheid van beton is een factor 2,4 groter als die van water waardoor de opwaartse kracht van het water nooit groter zal worden dan het gewicht van de constructie in het water. Zoals eerder in het document al naar voren is gekomen zullen er met betrekking tot oprijvende krachten alleen problemen ontstaan wanneer er gewerkt wordt met niet massieve constructies. Hierbij kan het gewicht van de constructie lager uitvallen dan de oprijvende kracht van het verplaatste water waardoor de constructie zal gaan oprijven.

4.5 Conclusie

Het ontwerp is nu geanalyseerd op de factoren van invloed. Hieruit zijn een aantal punten naar voren gekomen:

Stuwkracht:

- De stuwkracht in het voorbeeld vormt geen enkel gevaar voor de pijler. De sterkte, stijfheid en stabiliteit van de pijler blijft gewaarborgd.
- Bij een toename van de stroomsnelheid van de rivier neemt de stuwkracht kwadratisch toe waardoor de pijler mogelijk wel ernstige hinder ondervindt van het water.
- Stijging van het water zorgt voor een toename van het aangestroomde oppervlak waardoor de stuwkracht toeneemt.
- Een andere pijlervorm zorgt voor een ander weerstandscoefficiënt waardoor de stuwkracht kan toenemen.
- Extra controle van de materiaal eigenschappen van het gebruikte beton en staal is vereist in verband met de soms slechtere kwaliteit van deze materialen in landen als Afghanistan

Windkracht:

- De windkracht in het voorbeeld vormt geen enkel gevaar voor de pijler. De sterkte, stijfheid en stabiliteit van de pijler blijft gewaarborgd.
- Een andere pijlervorm zorgt voor een ander weerstandscoefficiënt waardoor de windkracht kan toenemen.
- Extra controle van de materiaal eigenschappen van het gebruikte beton en staal is vereist in verband met de soms slechtere kwaliteit van deze materialen in landen als Afghanistan

Sediment transport:

- Het probleem van bodem erosie is een dusdanig complex proces dat er geen duidelijke richtlijnen voor zijn.
- Door gebruik te maken van sedimentverzwarende maatregelen kunnen de problemen worden voorkomen.

Temperatuurverschillen:

- De gevolgen van de verandering van de temperatuur in de constructie zijn verwaarloosbaar.

- Verschil in temperatuur binnen de constructie kan leiden tot scheurvorming (met name bij gebruik van beton). Voorzorgsmaatregelen moeten genomen worden. Krimpwapening of een grotere betondekkingen zijn voorbeelden van deze maatregelen.

Botsingen:

- Botsingen met vuil en puin vormen een duidelijk probleem bij pijlerconstructies in rivieren.
- Door gebruik te maken van een geleide rail worden vuil en puin om de pijler geleid.
- Een geleide rail kan tevens gebruikt worden als 'stroombreker' waardoor de stuwkracht tegelijkertijd verminderd kan worden.

Aardbevingen:

- Het risico op aardbevingen in Afghanistan is nihil.
- Er zijn meerdere mogelijkheden om een pijler aardbevingbestendig(er) te maken.
- De fundering van een pijler speelt een grote rol in deze bestendigheid.

Opdrijvende krachten:

- Door het gebruik van massief beton zullen opdrijvende krachten geen problemen opleveren.
- Wanneer er gebruik gemaakt wordt van niet massieve constructies (bijv. basculekelders) moet er rekening gehouden worden met het gewicht van de constructie ten opzichte van de opdrijvende kracht van het verplaatste water.

Stuwkracht is het grootste risico voor een brugpijler. Wanneer de hoogte van het waterpeil maar vooral de snelheid van het water toeneemt zorgt dit voor een grote horizontale kracht. Verder is sediment transport een ingewikkeld fenomeen waardoor de gevaren moeilijk in te schatten zijn. Wel is het duidelijk dat om instabiliteit van een brugpijler te voorkomen, er gebruik gemaakt dient te worden van een van de genoemde oplossingen. Botsingen met vuil en puin en eventueel boten kunnen een groot gevaar zijn voor de sterkte stijfheid en stabiliteit. Dit gevaar kan echter relatief simpel voorkomen worden door gebruik te maken van de geleide rail. De overige factoren hebben in de case study nauwelijks een rol van betekenis gespeeld maar moeten zeker niet onderschat worden. In andere omstandigheden kunnen deze namelijk wel relevant worden.

5 Conclusies & aanbevelingen

In dit document zijn de factoren die van invloed zijn op een brugpijler in ondiep stromend water onderkend, uiteengezet en geanalyseerd.

Hierbij is gekeken naar de manier waarop deze factoren invloed hebben en hoe er met die invloed dient te worden omgegaan. Hieruit is gebleken dat al de genoemde factoren elk hun eigen oplossingen hebben maar dat deze ook zeker gecombineerd kunnen worden.

Vervolgens zijn de militaire en civiel mogelijkheden met betrekking tot de bouw van brugpijlers verkend. Ten slotte is er een case study uitgewerkt waarbij de verschillende factoren van invloed getoetst zijn om relevantie en uitwerking op de pijler. Van deze laatste twee onderdelen zullen de conclusies kort worden samengevat om vervolgens de daaruit volgende aanbevelingen te kunnen doen.

5.1 Bouwmethodes

Vervolgens is er gekeken naar de mogelijkheden die de genie heeft met betrekking tot het bouwen van brugpijlers.

5.1.1 Conclusie

Al snel werd duidelijk dat binnen de genie er kennis en materieel aanwezig is om pijlers te bouwen. Dit kan zowel met geprefabriceerde onderdelen (Bailey, Mabey & Johnson) als door middel van geïmproviseerde constructies (stapellichamen, jukken en/of schragen etc.). Er is echter een gebrek aan kennis en mogelijkheden met betrekking tot het funderen van brugpijlers. Al met al kunnen de volgende conclusies getrokken worden.

- Kennis en materieel voor de bouw van brugpijlers is aanwezig binnen de genie.
 - Drijvende pijlers
 - Bailey, Mabey & Johnson
 - Geïmproviseerd
- De fundering op staal is de enige gebruikte funderingstechniek van funderen.
- Er is (gedateerde) kennis aanwezig over het funderen op palen

Met betrekking tot de civiel gebruikte bouwmethodes bleken er een aantal bouwmethoden naar voren te komen.

- *Caissonfundering*

Bleek een goede manier om een fundering in een rivier te construeren. De specialistische kennis en materieel zorgt er echter voor dat de implementatie bij defensie erg complex is. De puttenfundering biedt wel mogelijkheden vanwege het eenvoudigere karakter van deze techniek. Kanttekening hierbij is dat zonder een manier waarop het waterpeil geconditioneerd kan worden, deze funderingstechniek niet toegepast kan worden.

- *Damwandkuip*

Een geschikte methode om een droge bouwput te creëren waarbinnen één van de andere funderingstechnieken toegepast kunnen worden, maar de omgeving is bepalend voor de toepasbaarheid, dit in verband met de beperkte diepte die bereikt kan worden en het flexibele karakter van de damwand.

- *Paalfundering*

Bij paalfunderingen zijn er weinig beperkingen met betrekking tot toepassing. Er is echter wel een grote mate van kennis en materieel voor vereist. Voordeel bij deze techniek is de in beperkte mate al aanwezige kennis en materieel binnen defensie.

- *Aanpassen van het waterpeil*

Het aanpassen van het waterpeil is een goede oplossing maar alleen toepasbaar bij kleinschalige projecten. Bij rivieren als de Tiran is deze methode niet toepasbaar. Deze methode is dan ook niet interessant voor defensie.

De algemene conclusie die getrokken kan worden is dat er een aantal methoden zijn die zeer zeker interessant zijn voor defensie. De precieze toepassing maar met name de implementatie van de verschillende technieken zal verder onderzocht moeten worden om een onderbouwde keuze te kunnen maken. Verder is er gebleken dat combinaties van verschillende technieken mogelijk zijn. Dergelijke combinaties zorgen er voor dat de technieken in vele situaties toegepast kunnen worden.

5.1.2 Aanbeveling

De bouwmethodes zijn kort aangehaald en de toepasbaarheid is besproken. Aangezien funderingstechnieken een vak apart is, kan niet verder ingegaan worden op de precieze uitvoering van de verschillende methodes. Daarom worden er enkel de volgende aanbevelingen met betrekking tot verdere verdieping gedaan.

- De caissonfundering is een complexe constructie methode en is daarom moeilijk implementeerbaar bij defensie. Een simpelere vorm van de caissonfundering is de puttenfundering. Deze biedt wel degelijk mogelijkheden voor de genie. Verdere uitwerking van de mogelijkheden en onmogelijkheden wordt daarom aanbevolen.
- De damwandkuip methode is relatief simpel toepasbaar maar biedt op zichzelf geen fundering. Het dient de aanbeveling om te onderzoeken op welke manier deze bouwmethode gecombineerd kan worden met een andere methode (bijvoorbeeld de puttenfundering).
- Omdat een fundering op palen in een zeer groot aantal situaties toepasbaar is, dient het een aanbeveling om hier verder onderzoek naar te doen. Inventarisatie van de nog aanwezige kennis en wellicht zelfs materieel kan daar een deel van zijn.
- Combinaties van verschillende technieken zijn mogelijk. Bestaande technieken binnen de Genie kunnen wellicht gecombineerd worden met enkele van de civiel gebruikte technieken.

5.2 Case study

In de case study zijn alle factoren van invloed aanbod gekomen hierbij werd duidelijk welke factoren van belang waren en welke minder invloed hebben op de pijler.

5.2.1 Conclusie

Stuwkracht bleek het grootste risico voor een brugpijler. Wanneer de hoogte van het waterpeil maar vooral de snelheid van het water toeneemt zorgt dit voor een grote horizontale kracht. Verder is sediment transport een ingewikkeld fenomeen waardoor de gevaren moeilijk in te schatten zijn. Wel is het duidelijk dat om instabiliteit van een brugpijler te voorkomen, er gebruik gemaakt dient te worden van een van de genoemde oplossingen. Botsingen met vuil en puin en eventueel boten kunnen een groot gevaar zijn voor de sterkte stijfheid en stabiliteit. Dit gevaar kan echter relatief simpel voorkomen worden door gebruik te maken van de geleide rail. De overige factoren hebben in de case study

nauwelijks een rol van betekenis gespeeld maar moeten zeker niet onderschat worden. In andere omstandigheden kunnen deze namelijk wel relevant worden.

5.2.2 Aanbevelingen

Door de analyse is er inzicht gecreëerd in de manier waarop verschillende factoren invloed hebben op een brugpijler. Bij enkele van de geanalyseerde factoren is dit inzicht echter beperkt. Om nog beter te kunnen reageren op deze invloedsfactoren dient het de aanbeveling om deze verder uit te diepen. De factoren waarbij dit nodig is zijn:

- Erosie (door sediment transport)

Het probleem is geschetst en de gevolgen zijn ook duidelijk. Wat niet duidelijk is, is de manier waarop de mate waarin deze special vorm van bodemerosie plaatsvindt te kunnen meten alvorens een pijler te bouwen. Een aantal relevante parameters zijn aangeleverd. Het dient een aanbeveling om dit proces nader te bestuderen.

- Aanvaring

In de case study was er geen sprake van scheepvaart. Wanneer dit in realiteit wel het geval is ontstaan er vragen naar de manier waarop een schip haar energie overbrengt op een pijler in geval van een botsing. Ook hier zijn kengetallen aangeleverd maar ontbreekt aan een duidelijke procesbeschrijving. Inzicht in dit proces kan er voor zorgen dat er adequaat ontworpen kan worden.

- Aardbevingen

Aardbeving vormen een groot gevaar voor de stabiliteit van constructies in het algemeen en dus ook voor brugpijlers. In het hoofdstuk aardbevingen is ingegaan op de situatie die ontstaat in geval van een aardbeving. Verder is er aangegeven in welke richting de oplossing gezocht dient te worden. Deze richtingen dienen uitgediept te worden om tot daadwerkelijke oplossingen te komen. Verdieping in de materie van het bouwen in seismisch gebiedt helpt hier wellicht bij.

Verder zijn er een aantal praktische aanbevelingen die gedaan kunnen worden.

- Het gebruik van vakwerkconstructies wordt aanbevolen. Deze manier van construeren beperkt het oppervlak van de brugpijler wat loodrecht op de wind of het water staat waardoor zowel de stuwkracht als de windkracht beperkt wordt.
- Wanneer er niet gekozen (kan) worden voor een vakwerkconstructie, dient er voor een ronde dan wel ovale vorm van de pijler gekozen te worden. Tijdens het berekenen van de stuwkracht bleek dat een vierkante vorm ten op zichten van een ronde vorm een verdubbeling van de stuwkracht veroorzaakt. Door de ronde vorm wordt tevens de bodemerosie als gevolg van sediment transport verminderd. Hierdoor wordt de kans op onderspoeling verkleind.
- Het dient een aanbeveling dat in alle gevallen een geleide rail constructie te plaatsen. Dit zorgt ervoor dat het water om de pijler heen geleid wordt waardoor de stuwkracht op de pijler verminderd. Daarbij zal de stroming direct om de pijler daarom verminderen waardoor de bodem erosie beperkt wat de kans op onderspoeling verkleind. Als derde voordeel kan genoemd worden dat vuil en puin (en eventueel kruiend ijs) door deze constructie om de pijler geleid worden waardoor de pijler niet beschadigd als gevolg van botsingen.
- In de case study is grotendeels gebruikt gemaakt van Nederlandse kwaliteitsnormen en constructie eisen. Bij het bouwen van infrastructuur in gebieden als Afghanistan moet overwogen worden met welke kwaliteit met betrekking tot het materiaal er gewerkt wordt. Sterkte, stijfheid en stabiliteit zijn voor een groot deel afhankelijk van deze kwaliteit waardoor er bij inferieure materialen problemen kunnen ontstaan. Het dient dus de aanbeveling om de materialen te testen op hun constructieve eigenschappen alvorens ze te gebruiken.

6 Literatuurlijst

- Bone A.H.L.G. (Red.) (2003). *Bouwkunde Tabellenboek*. 1^e druk. Groningen: Wolters-Noordhoff.
bouwkundige. 7^e druk. Culemborg: Stam Technische Boeken.
- Brest van Kempfen, C.P. (1940). *Het bouwen in seismisch gebied*. Batavia: G. Kolff & Co.
- Geest F.P.J. van. (1984). *Bruggen*. Culemborg: Stam Technische Boeken.
- Jansen P.Ph. (ed.) (1994). *Principles of River Engineering: The non-tidal alluvial river*. Delft: Delftse Uitgevers Maatschappij b.v.
- Hsai-Yang Fang (1991). *Foundation Engineering Handbook*. 2^e druk New York: Chapman & Hall
- Laan van der E.J.(1993). *Eindstudie KMA: Onderzoek naar het toepassen van stalen steigerbuizen bij het bouwen van een brugpijler*. Breda: Koninklijke Militaire Academie
- Nortier, I.W. & Koning, P. de (1991). *Toegepaste vloeistofmechanica. Hydraulica voor water-*
- Ringnalda, J. (1977). *Technische stromingsleer*. Culemborg: Stam Technische Boeken.
s'Hertogenbosch: ENCI Media
- Sagel R. & van Dongen A.J. (2004). *Cement en Beton: Constructieleer gewapend beton*.
- Steehouder M. (e.a.) (1999). *Leren communiceren: Handboek voor mondelinge en schriftelijke communicatie*. Groningen: Wolters-Noordhoff
- Tomlinson M.J. (1986). *Foundation design and Construction*. 5^e druk Essex: Longman Scientific & Technical
- Verruijt A. (1979). *Toegepaste Mechanica -1*. 2^e druk Delft: Vereniging voor Studie en Studentenbelangen.
- Verruijt A. (1980). *Toegepaste Mechanica -2*. 2^e druk Delft: Vereniging voor Studie en Studentenbelangen.
- Walter H. Graf (1998). *Fluvial Hydraulics. Flow and transport processes in channels of simple geometry*. West Sussex: Jonh Wiley & Sons Ltd

5.1 Geraadpleegde militaire publicaties en instanties:

(1960) VS 5-1 *Verzameling van Genietechnische gegevens*. 3^e druk

(2002) HB 5-51 *Geïmproviseerd*. 1^e druk

(2003) *Compact 200 Super Panel Bridge–Logistic Support Bridge Manual*. Reading: Mabey & Johnson Ltd

(2004) HB 5-164 *Technieken Bailybrug*. 2^e druk

‘Machinistenschool’ van het ‘Opleidings en trainingscentrum Genie’ te Vught

‘Bruggenschool’ van het ‘Opleidings en trainingscentrum Genie’ te Hedel

5.2 Internetbronnen

1. <http://aerodyn.org/>
2. <http://images.google.nl>
3. <http://www.wikipedia.org>

Bijlage 1: Wapeningstabel

Wapeningpercentages in relatie met het maximaal toelaatbaar moment.

$\frac{M_u}{bd^2}$	FeB 220 $k_{x,max}=0.725$		FeB 400 $k_{x,max}=0.588$		FeB 500 $k_{x,max}=0.535$		k_x	k_z
	k_s	ω_0	k_s	ω_0	k_s	ω_0		
200	.189	0.11	.348	0.06	.432	0.05	.018	.993
400	.187	0.21	.345	0.12	.429	0.09	.036	.986
600	.186	0.32	.343	0.18	.426	0.14	.054	.979
800	.185	0.43	.340	0.24	.423	0.19	.073	.972
1000	.183	0.55	.337	0.30	.419	0.24	.092	.964
1200	.182	0.66	.335	0.36	.416	0.29	.112	.957
1400	.180	0.78	.332	0.42	.413	0.34	.131	.949
1600	.179	0.89	.329	0.49	.409	0.39	.151	.941
1800	.177	1.02	.327	0.55	.406	0.44	.171	.933
2000	.176	1.14	.324	0.62	.402	0.50	.192	.925
2200	.174	1.26	.321	0.69	.399	0.55	.213	.917
2400	.173	1.39	.318	0.75	.395	0.61	.235	.909
2600	.171	1.52	.315	0.83	.392	0.66	.257	.900
2800	.169	1.65	.312	0.90	.388	0.72	.279	.891
3000	.168	1.79	.309	0.97	.384	0.78	.302	.882
3200	.166	1.93	.306	1.05	.380	0.84	.326	.873
3400	.164	2.07	.302	1.12	.376	0.90	.350	.864
3600	.162	2.22	.299	1.20	.372	0.97	.375	.854
3800	.160	2.37	.296	1.29	.367	1.03	.400	.844
4000	.159	2.52	.292	1.37	.363	1.10	.426	.834
4200	.157	2.68	.288	1.46	.358	1.17	.453	.824
4400	.154	2.85	.285	1.55	.354	1.24	.481	.813
4600	.152	3.02	.281	1.64	.349	1.32	.510	.802
4800	.150	3.20	.276	1.74	.344	1.40	.540	.790
5000	.148	3.38	.272	1.84			.571	.778
5200	.145	3.58	.268	1.94			.604	.765
5400	.143	3.78					.639	.752
5600	.140	4.00					.675	.738
5800	.137	4.23					.714	.722
6000	.134	4.47					.755	.706

M_u in kNm b in m; d in m
 $A_s = \omega_0 * b * d * 10^4$ [mm²]; $x = k_x * d$;
 $A_s = M_u / (k_s * h)$ [mm²]; $z = k_z * d$;

Bijlage 2: Berekeningen Stuwkracht

$q = 1,5 \cdot 3,68 = 552 \text{ N/m} = 0,552 \text{ kN/m}$
 $F = 1,5 \cdot 1710 = 1100 \text{ kN}$

$V_A = 0,552 \cdot 1,4 = 0,77 \text{ kN}$
 $H_A = F = 1100 \text{ kN}$
 $M_A = 0,552 \cdot 1,4 \cdot 0,7 = 0,5 \text{ kNm}$

$M_{\max} = M_A = 0,5 \text{ kNm}$

$E'_{b_{c20/25}} = 28500 \text{ N/mm}^2$
 $E'_{b_{gescheurd}} = 0,3 \cdot 28500 = 8550 \text{ N/mm}^2 = 8,55 \cdot 10^6 \text{ kN/m}^2$
 $I = \frac{1}{4} \pi r^4 = \frac{1}{4} \pi \cdot 0,6^4 = 0,1 \text{ m}^4$
 $\frac{q l^4}{8 EI} = \frac{0,552 \cdot 5^4}{8 \cdot 8,55 \cdot 10^6 \cdot 0,1} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ m} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ mm}$

$$e_{\text{minimaal}} = \frac{1}{300} \cdot l = \frac{1}{300} \cdot 5000 = 17 \text{ mm} \geq 10 \text{ mm}$$

$$M_d'_{\text{minimaal}} = 0,1 \cdot h \cdot N_d' = 0,1 \cdot 0,6 \cdot 11400 = 684 \text{ kNm}$$

Stuwkracht:

$$e_0 = \frac{M_d}{N_d'} = \frac{684}{11400} = 0,06 \text{ m} = 60 \text{ mm}$$

$$2^{\text{e}} \text{ orde: } e_c = (4,5h + 6,7e_0) \cdot \left(\frac{l_c}{100h}\right)^2$$

$$h = 600 \text{ mm}$$

$$l_c = 2l = 10000 \text{ mm}$$

$$e_c = (4,5 \cdot 600 + 6,7 \cdot 60) \cdot \left(\frac{10000}{100 \cdot 600}\right)^2$$

$$e_c = 3102 \cdot 0,028 = 86 \text{ mm}$$

$$e_t = e_c + e_0 = 86 + 60 = 146 \text{ mm}$$

$$N_d' = 1140 \text{ kN} = 1140 \cdot 10^3 \text{ N}$$

$$f_b' = 15 \text{ N/mm}^2$$

$$A_b = \pi r^2 = \pi \cdot 600^2 = 11,3 \cdot 10^5 \text{ mm}^2$$

$$\frac{N_d'}{f_b \cdot A_b} \cdot \frac{e_t}{h} = 0,07 \cdot 0,24 = 0,02$$

Bijlage 3: Berekeningen capaciteit pijler

$$\underline{\underline{M_{toelaatbaar} = 417 \text{ kNm}}}$$

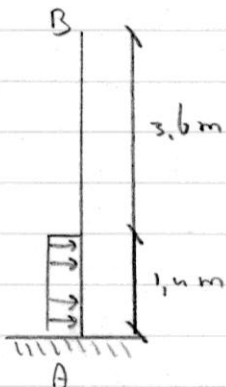
Water stijgt: ~~stijgt:~~

$$A = \frac{1}{2} \cdot 2\pi \cdot 0,6 \cdot 5 = 9,4 \text{ m}^2$$

$$F_{stuw} = 10 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1000 \cdot (0,625)^2 \cdot 9,4 \\ = 1,8 \text{ kN}$$

$$M_A = 368 \cdot 5 \cdot 2,5 = 4600 \text{ Nm} = 4,6 \text{ kNm}$$

Toenemende stroomsnelheid:



$$M_A = 417 \text{ kNm}$$

$$M_A = q \cdot 1,4 \cdot 0,7 = 417 \text{ kNm}$$

$$q = 426 \text{ kN/m}$$

$$\frac{426}{\frac{1}{2} \cdot 2\pi \cdot 0,6} = 226 \text{ kN/m}^2$$

$$F_{stuw,max} = 226 \cdot A = 226 \cdot 9,4 = 596 \text{ kN}$$

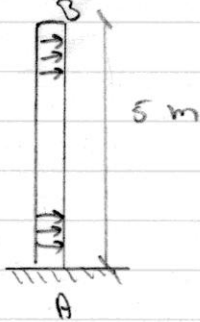
$$F_{stuw} = 10 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1000 \cdot v^2 \cdot 9,4 = 596 \cdot 10^3 \text{ N}$$

$$v^2 = 451,5$$

$$v = 21,2 \text{ m/s}$$

Toenemende snelheid + stijgend water:

$$A = 9,4 \text{ m}^2$$



$$M_A = q \cdot 5 \cdot 2,5 = 417 \text{ kNm}$$

$$q = 33 \text{ kN/m}$$

$$\frac{33}{\frac{1}{2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,6} = 17,5 \text{ kN/m}^2$$

$$F_{stuwmax} = 17,5 \cdot A = 17,5 \cdot 9,4 = 164,6 \text{ kN}$$

$$F_{stuw} = 1,0 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1000 \cdot v^2 \cdot 9,4 = 164000 \text{ N}$$

$$v^2 = 34,9$$

$$v = 5,9 \text{ m/s} = 21,3 \text{ km/h}$$

Bijlage 4: Berekeningen Windkracht

$q = 1.5 \cdot 1095 = 1622,5 \text{ N/m}$
 $= 1,6 \text{ kN/m}$

$F = 1140 \text{ kN}$

$V_A = 3,6 \cdot 1,6 = 5,76 \text{ kN}$
 $H_A = F = 1140 \text{ kN}$
 $M_A = 3,6 \cdot 1,6 \cdot 3,2 = 18,4 \text{ kNm}$

$E'_{\text{buigend}} = 8,55 \cdot 10^6 \text{ kN/m}^2$
 $I = 0,1 \text{ m}^4$

$\frac{q l^4}{8 E I} = \frac{1,6 \cdot 5^4}{8 \cdot 8,55 \cdot 10^6 \cdot 0,1} = 1,46 \cdot 10^4 \text{ m} = 0,15 \text{ mm}$

$$e_{\text{minimaal}} = \frac{1}{300} \cdot l = \frac{1}{300} \cdot 5000 = 17 \text{ mm} \geq 10 \text{ mm}$$

$$M_{d' \text{ minimaal}} = 0,1 \cdot h \cdot N_d' = 0,1 \cdot 0,6 \cdot 11400 = 684 \text{ kNm}$$

Stuwkracht:

$$e_0 = \frac{M_d}{N_d'} = \frac{684}{11400} = 0,06 \text{ m} = 60 \text{ mm}$$

$$2^{\text{e}} \text{ orde: } e_c = (4,5h + 6,7e_0) \cdot \left(\frac{l_c}{100h}\right)^2$$

$$h = 600 \text{ mm}$$

$$l_c = 2l = 10000 \text{ mm}$$

$$e_c = (4,5 \cdot 600 + 6,7 \cdot 60) \cdot \left(\frac{10000}{100 \cdot 600}\right)^2$$

$$e_c = 3102 \cdot 0,028 = 86 \text{ mm}$$

$$e_f = e_c + e_0 = 86 + 60 = 146 \text{ mm}$$

$$N_d' = 11400 \text{ kN} = 11400 \cdot 10^3 \text{ N}$$

$$f_b' = 15 \text{ N/mm}^2$$

$$A_b = \pi r^2 = \pi \cdot 600^2 = 11,3 \cdot 10^5 \text{ mm}^2$$

$$\frac{N_d'}{f_b \cdot A_b} \cdot \frac{e_f}{h} = 0,07 \cdot 0,24 = 0,02$$

Bijlage 5: Grafiek kolomwapening

