

Verslag Eindopdracht Tinlab

**Sam Cornelisse 0987282
Chiara Bakker 0993154
Rowdey Goos 0998898
Daniël van der Drift 0986788**

20 april 2022

Inhoudsopgave

1 Samenvatting	2
2 Inleiding	2
3 Theoretisch Kader	2
3.1 Begrippenlijst	3
4 Methodologie	3
4.1 Dataverzameling	4
4.2 Inclusie- en exclusiecriteria	4
4.3 Onderzoeksverloop	4
4.4 Data-analyse	4
4.5 Validiteit en betrouwbaarheid	4
5 Literatuuronderzoek	4
5.1 Wat is een sluis?	4
5.2 Hoe opereert een sluis?	6
5.3 Hoe wordt een sluis onderhouden?	10
5.3.1 Dagelijkse inspectie	10
5.3.2 Door ontwikkelen onderhoud	10
5.4 Wat kan er fout gaan met een sluis?	11
6 Requirements	12
6.1 Veiligheid	12
6.2 Efficiëntie	13
6.3 Capaciteit	13
6.4 Onderhoud	13
6.5 Onderhoudskosten	13
6.6 Duurzaamheid	14
7 Model	14
7.1 Onderdelen	14
7.1.1 Sluiscontroller	14
7.1.2 Schutkolk	15
7.1.3 Sluisdeur	15
7.1.4 Stoplicht	16
7.2 Totaal model	16
8 Verifiëren	17
9 Conclusie	18
10 Bijlagen	20
Referenties	21

1 Samenvatting

2 Inleiding

Op 24 maart 2022 schreef het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat een brief over de staat van de sluizen in Nederland. Een groot aantal sluizen bleek gerenoveerd te moeten worden. Het plan is om de sluizen gecombineerd te renoveren en automatiseren.

Het ministerie van infrastructuur en waterstaat heeft onvoldoende kennis van ICT om de systemen in deze sluizen te ontwerpen. Ons is gevraagd om een model te maken van een sluis, zodat op basis hiervan, verschillende, volledig geautomatiseerde sluizen gerealiseerd kunnen worden.

Het doel is om een model van een sluis te ontwerpen. Om dit doel te kunnen volbrengen moet eerst onderzoek gedaan worden naar de werking van een sluis en weke requirements hierbij passen. Tot slot moet het model getest worden of dit wel voldoet aan de opgestelde requirements. Het resultaat is een model dat gebruikt kan worden om sluizen te ontwikkelen en aan te sturen.

3 Theoretisch Kader

Om een zinvol, accuraat model van een sluis te maken zijn er bepaalde aspecten van dit onderwerp die eerst uitgelicht moeten worden. Voor het bereiken van dit doel zijn een aantal deelvragen opgesteld.

Zo gaan wij onderzoeken wat een sluis is. Dit onderzoek focust zich op sluizen van de scheepvaart. Niet alleen wordt de definitie van de sluis verder uitgewerkt, er wordt ook gekeken naar sluizen van verschillende capaciteiten en functies. Het beantwoorden van deze deelvraag zal ons helpen om beslissingen te kunnen maken omtrent het model met betrekking tot welke onderdelen er zijn, en welke relevant zijn te modelleren.

Verder onderzoeken wij ook hoe een sluis opereert. Gezien dit onderzoek moet leiden tot een model die de (automatische) functie van een sluis demonstreert, is het belangrijk om te weten welke operaties uitgevoerd moeten worden om een sluis correct te laten functioneren. Het onderzoek van deze functionaliteiten zal later ook helpen met het bepalen van welke selectie hiervan relevant is om te includeren in het model.

Ook zal er onderzoek worden gedaan naar hoe sluizen onderhouden worden. Om eisen op te kunnen stellen met betrekking tot de duurzaamheid en onderhoud van een sluis is het relevant om te weten wanneer, waarom en waaraan een sluis onderhouden moet worden. De conclusie van deze deelvraag zal ook gebruikt worden om een licht te schijnen op hoe de twee eerder genoemde abstracte aspecten van het eisenpakket mogelijk gemodelleerd zouden kunnen worden.

Als laatste zullen wij ook onderzoek doen naar wat er allemaal fout kan gaan met een sluis. Wij hopen hiervan te leren wat de foutgevoelige onderdelen zijn van de sluis, en wat eraan gedaan kan worden om deze fouten te voorkomen. Deze informatie wordt hierna gebruikt om eisen op te stellen omtrent de veiligheid van

het systeem, en er wordt mee rekening gehouden gedurende de ontwikkeling van het model.

Er is al eerder onderzoek gedaan naar het simuleren van sluizen. Zo is er in 1976 een onderzoek uitgevoerd naar het optimaliseren van het verkeer binnen een gesimuleerd kanalen netwerk (Oosterveld, 1976). Het onderzoek beschrijft het simulatie model, haar onderdelen, en andere specificaties als hoe schepen worden gegenereerd en het proces dat de sluis doorloopt. Dit model was gebouwd binnen de simulatietaal PROSIM. Het artikel beschrijft ook aan wat voor aspecten het model geoptimaliseerd kon worden om kosten, reistijd en benutting van kanalen te verbeteren. Dit laatste is minder relevant voor ons onderzoek. Het nut van dit onderzoek binnen dat van ons zou beperkt kunnen zijn door het feit dat het 46 jaar oud is.

3.1 Begrippenlijst

Verval: "Verschil in hoogte van de waterspiegel op twee punten van een rivier" (Van Dale, 2022)

Sluis: Een sluis is een scheiding tussen 2 wateren, met deuren. Hierdoor is het mogelijk het waterpeil te beïnvloeden. Sluizen reguleren het waterpeil zodat schepen kunnen passeren. (Rijkswaterstaat, 2022)

Sluishoofd: "Het sluishoofd is het onderdeel van de schutsluis waarin zich de beweegbare afsluitmiddelen bevinden." (Bezuijen, 2000)

Kering: Een kering splitst twee lichamen van water. De kering staat toe dat het water aan de ene kant kan stijgen of dalen, tot hoger/lager dan de andere kant, terwijl het niveau aan deze andere kant onveranderd blijft. (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat & Rijkswaterstaat, 2018)

Schutkolk: "De schutkolk is het onderdeel van de schutsluis waarin de schepen liggen tijdens de verandering van het waterniveau: de afsluitbare ruimte in de definitie van de schutsluis." (Bezuijen, 2000)

Roldeur: Een translatie kering die zich horizontaal beweegt, loodrecht op het sluishoofd. Kan bestaan uit één of twee deuren. (Bezuijen, 2000)

Hefdeur: Een translatie kering die zich verticaal omhoog beweegt. (Bezuijen, 2000)

Puntdeur: Een rotatie kering die er dicht uitziet als een punt en open kan zwaaien als water aan weerszijden gelijk staat. (Bezuijen, 2000)

CEMT: De Conférence Européenne des Ministres des Transports. Ook wel de Europese conferentie van ministers van transport. (CEMT, 1992)

4 Methodologie

In dit onderzoek is er kwalitatief en kwantitatief onderzoek uitgevoerd om antwoord te geven op de vraag hoe er een model gemaakt kan worden voor een sluis systeem die voldoet aan de vereisten van de ambtenaar. Hiervoor is literatuuronderzoek gedaan en zijn vervolgens modellen gemaakt aan de hand van dit literatuuronderzoek.

4.1 Dataverzameling

Voor het literatuuronderzoek zijn er bronnen en artikelen gezocht via Google die betrekking hebben tot sluizen en de vereisten van de ambtenaar. Daarbuiten is er ook gebruik gemaakt van de verschillende databases waarin de Hogeschool Rotterdam in voorziet.

4.2 Inclusie- en exclusiecriteria

Voor het literatuuronderzoek zijn er gebruikgemaakt van bronnen en artikelen die te vinden zijn op het web in het Nederlands of Engels. Er is zich niet beperkt tot een bepaalde tijdsperiode aangezien sluizen een oud concept zijn en informatie hierover nog steeds relevant is ongeacht de tijd van schrijven. Bovendien is er gekeken naar sluizen over de hele wereld en niet alleen in Europa.

4.3 Onderzoeksverloop

Na vraag van de ambtenaar naar een model van een geautomatiseerde sluis is er eerst een literatuuronderzoek verricht naar de verschillende aspecten van een sluis. Dit literatuuronderzoek is onderbouwd door verschillende relevante bronnen die te vinden zijn over het onderwerp. Het vinden van verschillende soorten situaties bij de mogelijke sluisrampen was lastig aangezien de meeste rampen in dezelfde categorie vallen. Hierdoor moest het aantal situaties beperkt worden.

4.4 Data-analyse

De verkegen informatie over de sluizen uit veschillende bronnen, is met elkaar vergeleken.

4.5 Validiteit en betrouwbaarheid

Ter behoeve van de validiteit zijn de gemaakte modellen gebaseerd op de verkregen informatie uit het literatuuronderzoek. Om de betrouwbaarheid van de modellen te garanderen, zijn de modellen geverifiërd aan de hand van de requirements die vertaald zijn naar ctl voor verificatie in Uppaal. Aangezien niet alle requirements naar ctl vertaald kunnen worden, is het verificatieproces beperkt tot de requirements die wel vertaald kunnen worden naar ctl. Vervolgens is er gereflecteerd of het verificatieproces juist is verlopen en of er mogelijke verificaties niet gelukt zijn.

5 Literatuuronderzoek

5.1 Wat is een sluis?

Rijkswaterstaat definieert een sluis als een scheiding tussen 2 wateren, met deuren, waarmee het mogelijk is om het waterpeil te beïnvloeden. Sluizen reguleren het waterpeil zodat schepen kunnen passeren. (Rijkswaterstaat, 2022)

In Nederland zijn veel verschillende soorten sluizen te vinden (Waterschap Noorderzijlvest, 2021),(Arends, 1994). Zo zijn er doksluizen die worden gebruikt om het waterpeil in droogdokken en havens te regelen, en bijvoorbeeld spuisluizen die voorkomen dat de vaargeul waaraan ze zijn aangesloten dichtslibben door middel van een kom met zeewater die wordt gevuld tijdens vloed, en weer leeg wordt laten gelopen als het eb is (Waterschap Noorderzijlvest, 2021),(Arends, 1994).

Dit onderzoek daarentegen focust zich op schutsluizen. Schutsluizen verschillen in veel andere sluizen in dat ze beschikken over twee of meer sluishoofden. Dit leidt ten gevolge ook tot dat schutsluizen een schutkolk hebben. De afgesloten ruimte die wordt gecreëerd als de keringen in de sluishoofden worden gesloten. De schutkolk kan gebruikt worden om geleidelijk het verval tussen de twee waterhoogten aan de buitenzijden van de sluishoofden te overbruggen. (Bezuijen, 2000)

In Nederland kent men verschillende soorten schutsluizen met verschillende soorten sluishoofden, keringen en schutkolken. Deze sluizen van onderling hetzelfde type zijn ook in verschillende grootten te vinden, het is bijvoorbeeld ook mogelijk dat de aandrijving van de keringen anders is. (Bezuijen, 2000), (Arends, 1994)

Om wat dieper in te gaan op de keringen van schutsluizen, deze zijn over het algemeen op te delen in twee categorieën: de *translatie* keringen en de *rotatie* keringen. (Bezuijen, 2000)

De translatie keringen baseren hun bewegen op translatie, dit wil zeggen zijdelingse verplaatsing. Zo zijn er sluisdeuren te vinden die zich horizontaal bewegen, door het midden, (*roldeur*) of bijvoorbeeld één deur die omhoog gaat (*hefdeur*). Dit laatste type zorgt wel voor een maximale doorvaar hoogte, iets wat niet hoeft te zijn bij de horizontale translatie of de rotatie keringen. (Bezuijen, 2000), (Arends, 1994)

Dan zijn er dus ook nog de rotatie keringen. Deze gaan uit, zoals de naam laat blijken, van een rotatie in het openen en sluiten van de kering. Rotatie keringen, ook wel *puntdeuren* gaan uit van twee deuren. Deze twee deuren vormen een punt. Deze punt is dan gericht naar het hogere deel van het verloop. Dit zorgt er namelijk voor dat het hoger staande water tegen de punt in duwt, en verzekerd dat de deuren dicht zijn, en fysiek niet open kunnen gaan tijdens het op- of neerschutten. (Bezuijen, 2000), (Arends, 1994)

Om daadwerkelijk een boot op- of neer te kunnen schutten moet men wel eerst de mogelijkheid hebben om de schutkolk te vullen met water, en om dit water weer weg te kunnen laten lopen (ledigen). Het volbrengen van deze twee processen kan op een aantal manieren. Over het algemeen zullen sluizen met hefdeuren simpelweg hun hefdeuren langzaam op laten komen. Op deze manier kunnen deze sluizen geleidelijk de boten in de schutkolk op - en neerschutten. (Bezuijen, 2000)

Er zijn ook sluizen te vinden met luiken in hun deuren. Deze luiken kunnen worden opgezet om de schutkolk of te vullen of te ledigen. Dit type van toe en afvoer is toe te passen op ieder type sluis. (Bezuijen, 2000)

Als laatste heeft met ook nog de omloopriolen. Deze waterleidingen hebben meestal luiken op hun ingangen die opgezet kunnen worden om of water toe te voeren, of om water af te voeren. Door de druk die het water op zichzelf uitoefent is er over het algemeen geen pomp nodig om deze riolen te gebruiken. (GWV, 2020), (Bezuijen, 2000)

In 1992 zijn type binnenvaart in klassen opgedeeld door het Conférence Européenne des Ministres des Transports, ook wel CEMT (CEMT, 1992). Nederland heeft wetgeving die er voor zorgt dat alle waterwegen in Nederland een CEMT classificatie hebben, zodat schippers weten wat voor route ze kunnen plannen met hun schip dat in een bepaalde klasse valt. Sluizen zijn hierbij geen uitzondering. In Nederland worden sluizen gebouwd naar een referentie schip, veelal is dit een schip gekozen door de persoon die de vaarweg beheert, en weet wat voor verkeer er over het algemeen door de vaarweg gaat. Tevens bepaalt dit schip ook de CEMT klasse van de vaarweg. (CEMT, 1992), (Rijkswaterstaat, 2020)

Sluizen zijn een kunstwerk dat je tegen kan komen tijdens het varen. Het gaan door een sluis brengt daarom ook verkeersregels met zich mee. Zo hebben sommige sluizen stoplichten, en zijn er borden te vinden aan de binnen- en buitenkant van de sluis. Aan weerszijden van de sluis zijn borden te vinden omtrent de regels in dergelijke sluis. De marifoon frequentie is er te vinden, samen met dingen als de verplichte snelheid, en of je wel of niet mag afmeren. (Zeilen, 2013)

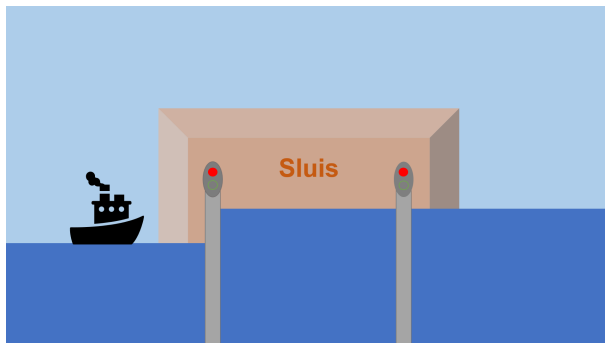
Er is ook nog een verschil tussen wanneer sluizen worden geschut. Hoewel vrijwel iedere sluis opening- en sluitingstijden heeft, schutten sommige sluizen op vaste momenten, terwijl je bij andere sluizen kan aanmelden, waarna je wacht op je beurt om geschut te kunnen worden.

De sluis die wordt gemodelleerd in dit onderzoek functioneert via de vaste schuttingstijden. Om hier een realistisch beeld bij te krijgen, is er gekeken naar meerdere tijdschema's van verschillende sluizen. Hieruit blijkt dat deze intervallen kunnen verschillen van het uur tot tweeënhalf uur.

5.2 Hoe opereert een sluis?

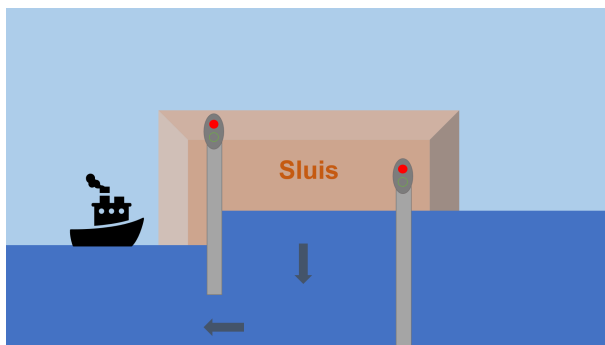
De gemiddelde sluis bestaat uit drie delen met twee schuiven die deze delen scheiden. Wanneer het hoogte verschil van het water heel groot is zijn er vaak meerdere delen en schuiven. In dit scenario gaan we er van uit dat deze sluis drie delen en twee schuiven heeft. Ook heeft deze sluis aan elke schuif een groen licht en een rood licht. Deze stoplichten zijn aan beide kanten van de schuiven zichtbaar.

Er komt een boot aan aan de linker kant van de sluis. Het waterniveau aan de rechter kant is hoger dan het waterniveau aan de linker kant van de sluis. Er is een stoplicht met een rood brandend licht die aan geeft dat doorvaart verboden is.



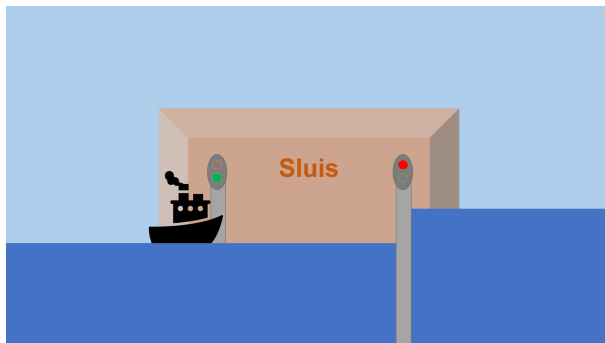
Figuur 1: Er komt een boot aan bij de sluis, die naar de andere kant moet.

Om de boot door de sluis heen te krijgen moet eerst het waterniveau in de sluis zakken naar het niveau aan de linker kant. De linker schuif gaat omhoog, hierdoor gaat het water in de sluis weg naar de linkerkant.



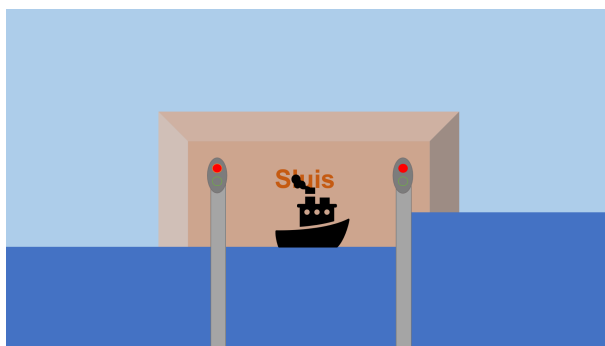
Figuur 2: De linker schuif gaat omhoog om het waterniveau in de sluis gelijk te krijgen.

Wanneer het waterniveau aan de linker kant en in de sluis gelijk is zakt de schuif naar beneden en gaan de deuren van de schuif open. Het groene licht brand nu om aan te geven dat doorvaart toegestaan is.



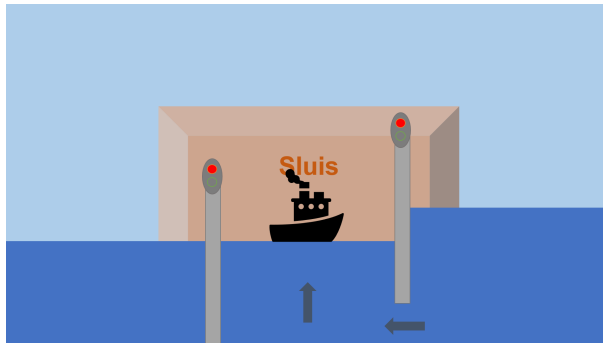
Figuur 3: Het linker groene licht brand en de boot vaart de sluis in.

De deuren van de linker schuif gaan dicht als de boot in de sluis is. Het licht van de linker schuif gaat weer naar rood.



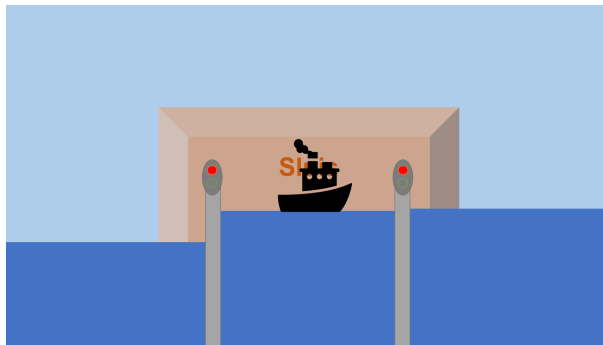
Figuur 4: De boot wacht in de sluis.

Het waterniveau moet nu gelijk worden met het niveau aan de linker kant. De rechter schuif gaat nu omhoog. Het waterniveau in de sluis wordt nu gelijk met de rechterkant.



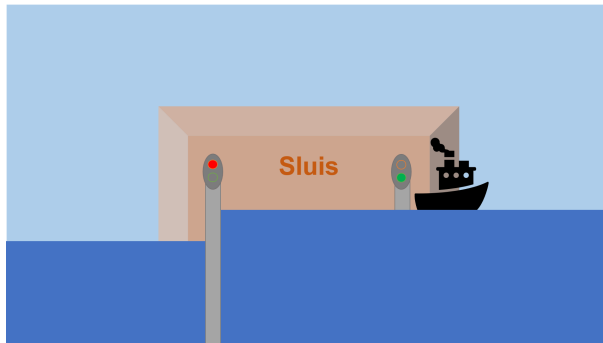
Figuur 5: De rechter schuif gaat omhoog om het waterniveau in de sluis gelijk te krijgen.

Wanneer het waterniveau aan de rechterkant en in de sluis gelijk is zakt de schuif weer naar beneden.



Figuur 6: Het waterniveau in de sluis is nu gelijk met de rechterkant.

De deuren van van de rechter schuif gaan nu open en het groene licht gaat branden. De boot vaart naar de rechterkant uit de sluis.



Figuur 7: Het waterniveau in de sluis is nu gelijk met de rechterkant.

5.3 Hoe wordt een sluis onderhouden?

5.3.1 Dagelijkse inspectie

Als er kleine problemen zijn met de staat van een sluiscomplex, kan de veiligheid van de schippers in de sluis in gevaar komen. Daarom is het van belang om de sluizen **dagelijks** te inspecteren en eventuele afwijkingen, bijvoorbeeld vroegtijdige veroudering, te signaleren en de beschikbaarheid van de sluis in te schatten. (Rijkswaterstaat, 2021)

De sluizen in het Twentekanaal mogen jaarlijks maximaal 20 uur buiten werking zijn ten gevolge van storingen. Dit is afgesproken door de minister van Infrastructuur en Waterstaat, en Rijkswaterstaat. Het doel is om de sluizen in goede conditie te houden en de sluizen zo min mogelijk uit gebruik te nemen. (Rijkswaterstaat, 2021)

Bij een inspectie loopt de aannemer alle onderdelen langs.

- Is de temperatuur goed?
- Gaan de deuren snel genoeg open?
- Is er roestvorming zichtbaar? (Maintenance, 2019)
- De fysieke delen worden afgestoft en doorgesmeerd, daarnaast herstelt de aannemer kleine schades en doet hij storingenherstel.
- Omdat onze sluizen steeds vaker volledig geautomatiseerd zijn, wordt er wekelijks of maandelijks een analyse gemaakt van de programmatuur.

(Rijkswaterstaat, 2021)

5.3.2 Door ontwikkelen onderhoud

Sluizen worden langzamerhand steeds moderner. Ook het onderhoud wordt gemoderniseerd met bijvoorbeeld smart maintenance, waarbij sensoren in de apparatuur zijn geplaatst om de technische conditie bij te houden. (Rijkswaterstaat, 2021)

Bij Sluis Eefde hangen er op diverse onderdelen van de sluis meetapparatuur. Bijvoorbeeld werd er aan de hand van energiemetingen op de hoofdverdeling van de schuiven heel af en toe een afwijking gedetecteerd in de vermogens tussen de drie fases. Toen een aannemer goed keek constateerde hij een onbalans in de motor. Deze onbalans wordt normaal gesproken pas opgemerkt als de tandwielkasten kapotgaan. Doordat dit nu tijdig werd ontdekt, werd de onbalans verholpen en is zo'n 20.000 euro aan schade en mogelijk ook het onderbreken van het gebruik voorkomen. (Maintenance, 2019)

Een volgende stap in dit proces zou kunnen zijn om ook monitoringsapparatuur voor het meten van trillingen te plaatsen, zoals nu al het geval is op de grote aandrijfmotoren en tandwielkasten. Op basis van energiedata en trillingsdata kunnen problemen nog sneller en accurater gevonden worden. Dit zou mogelijk maken dat het voorspellende model dan ook exact kan aanwijzen waar en op welk van de motoren het probleem zit en wat het is. Hierdoor hoeft een aannemer niet zelf meer fysiek te gaan zoeken. (Maintenance, 2019)

Weet wanneer corrosie begint Roest of corrosie treedt op bij objecten waar staal wordt gebruikt en die regelmatig in aanraking komen met water. Dit beïnvloedt de levensduur van een sluis. Bij de traditionele werkwijze worden objecten visueel geïnspecteerd op corrosie die men aan de bovenlaag waarneemt. In feite ben je dan altijd te laat. Zodra corrosie zichtbaar is, is de ontwikkeling ervan moeilijk te stoppen zonder drastische maatregelen, zoals bijvoorbeeld 'zandstralen van de hele sluisdeur'. Het herstellen van de onderliggende constructie en aanbrengen van een nieuwe beschermende laag enerzijds is al erg kostbaar. Daar bovenop komt dat de sluis voor een langere tijd onbruikbaar is. (Maintenance, 2019)

C-Cube, specialist in corrosie, heeft het doe on de kennis en kunde over corrosie te vertalen naar een onlinedienst; de 'predictive corrosion service'. Hiermee wordt berekend wanneer corrosie gaat optreden, jaren vooruit. Hiermee kunnen we onnodige schade door corrosie voor zijn en zorgt voor een kostenbesparing rond de 40%. De eerste toepassing van deze dienst is inmiddels succesvol getest binnen het project Sluis Eefde. (Maintenance, 2019)

5.4 Wat kan er fout gaan met een sluis?

Bij het modelleren van een systeem is het handig om rekening te houden met dingen die mis kunnen gaan in het systeem. Dit kan betrekking hebben tot hardware, software, omstandigheden van buitenaf maar ook een menselijke fout. Enkele van deze gevallen zullen daarom besproken worden zodat, in dien dit mogelijk is, deze kennis te gebruiken bij het modelleren.

In september 2009 was er een storing bij de Markland Locks and Dam op de Ohio rivier. Hierbij werkte één van de poorten niet zoals behoren vanwege gebreken in de onderdelen van de poort (*Corps finds cause of Ohio River Lock Failure — News ...*, 2009). De poort ging hierdoor niet dicht waardoor water direct weer weg kon stromen. Geen gewonden zijn hier bij gevallen alhoewel dit wel mogelijk zou zijn geweest als de poort het op het verkeerde moment zich begaf. Deze gebreken kwamen door de beperkte onderhoud die werd gedaan aan deze watersluis.

Vanwege de droogte in de zomer en herfstperiode in het jaar 2018 waren er enkele potentieele gevaren gemeld bij watersluizen in Nederland (van Poelgeest, 2020). Door de lage waterpeil kon er niet gegarandeerd worden dat de sluizen volledig intact kon blijven. Daarom hadden sommige nederlandse instanties de keuze gemaakt om een aantal van deze sluizen buiten bedrijf te stellen. Anderen sluizen werden wel operationeel gehouden ondanks de mogelijke gevaren dat dit met zich mee bracht.

Een ander ongeluk gebeurde in juli 2019 in de buurt van Londen waar een kanaalbootje zink na een fout van de bestuurder (Rodger, 2019). Bij de watersluis was aangegeven waar de boot zich moest bevinden op het moment dat dat het water zou dalen. De bestuurder daarentegen had deze waarschuwing niet gelezen en bevond zich hierdoor niet volledig in de sluis. Hierdoor raakte de boot een concrete richel en begon te zinken. Soort gelijken fouten waarbij een bestuurder niet de waarschuwingen had gelezen of te snel aan kwam varen gebeuren met enige regelmaat.

Problemen in een watersluis systeem vallen over het algemeen in deze drie categorieën. Deze drie categorieën zijn: storingen vanwege onderdelen die niet onderhouden zijn; externe factoren zoals een buitengewone waterpeil en menselijke fout. Het modelleren van deze categorieën kan een uitdaging zijn omdat deze problemen niet direct te maken hebben met het systeem zelf. Er kan eventueel rekening gehouden worden met factoren zoals waterpeil bij het modelleren van een watersluis. Zoals het automatisch buitenwerking stellen van een watersluis bij een te lage waterpeil. Gebreken aan fysieke onderdelen kunnen moeilijk gemodelleerd worden en hoeven niet relevant te zijn voor het model.

6 Requirements

Op basis van ons onderzoek hebben we requirements opgesteld om te kunnen voldoen aan de eisen van het ministerie. Deze zijn gebaseerd op het literatuur onderzoek. De eisen zijn hieronder gecategoriseerd te vinden.

6.1 Veiligheid

De veiligheid van de schippers en betrokkenen staat boven alles. De sluis moet zich aan een aantal regels houden om rampen te voorkomen. Ook moet het gebruik van de sluis duidelijk zijn voor de schippers.

- Sluisdeuren zijn dicht bij op- en neerschutten.
- Stoplichten staan altijd op rood/groen bij relevante staten van de deur.
- Deuren staan nooit tegelijkertijd open.
- De sluis is voorzien van waarschuwborden.

6.2 Efficiëntie

De boten moeten efficiënt gebruik kunnen maken van een sluis. Door een tijdschema te gebruiken kunnen de schippers hier rekening mee houden en zo hun tijd goed inplannen. Zo kunnen de boten ter plaatse zijn zonder lang voor de sluis te hoeven wachten.

- De sluis cycled binnen 120 minuten.
- De sluis cycled op basis van CEMT-klasse.
- De sluis cycled niet meer dan nodig.
- De sluis werkt op basis van een tijdschema.
- Iedereen mag eerst de sluis uit voordat de sluis weer vol loopt.

6.3 Capaciteit

De capaciteit is op basis van CEMT-klasse en op het referentieschip van de waterwegbeheerder. Zo is het aantal mogelijke boten vastgesteld met een algemeen bekende maatstaaf. De hoeveelheid boten kan in het model aangepast worden om te voldoen aan de wensen van het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat.

- De sluis heeft de correcte capaciteit gebaseerd op CEMT-klasse.
- De sluis heeft de correcte capaciteit gebaseerd op het referentieschip van de waterwegbeheerder.

6.4 Onderhoud

Inspectie en onderhoud is belangrijk om de sluis operationeel te houden. Om dit zo makkelijk mogelijk te maken moeten de onderdelen makkelijk bereikbaar zijn. Ook moet de staat van de apparatuur digitaal gemeten worden en waarschuwingen geven aan de sluisbediende bij problemen.

- De onderdelen van de sluis moeten bereikbaar zijn om dit makkelijk te kunnen onderhouden.
- De conditie van de apparatuur van de sluis moet automatisch gemeten worden met sensoren.
- De sluis bediende moet waarschuwingmeldingen krijgen van afwijkingen in de apparatuur.
- Bij een defect onderdeel moet de sluis niet gebruikt kunnen worden.

6.5 Onderhoudskosten

Het is wenselijk de onderhoudskosten zo laag mogelijk te houden.

- De onderhoudskosten moeten zo laag mogelijk zijn.

6.6 Duurzaamheid

Voor mens en natuur is het belangrijk de schade aan het milieu zo klein mogelijk te houden. De sluizen moeten duurzamer zijn voor het onlangs afgesloten klimaatakkoord.

- De sluis moet lang mee kunnen gaan.
- De sluis vervuult zo min mogelijk.
- De sluis brengt zo min mogelijk schade aan de omringende natuur.

7 Model

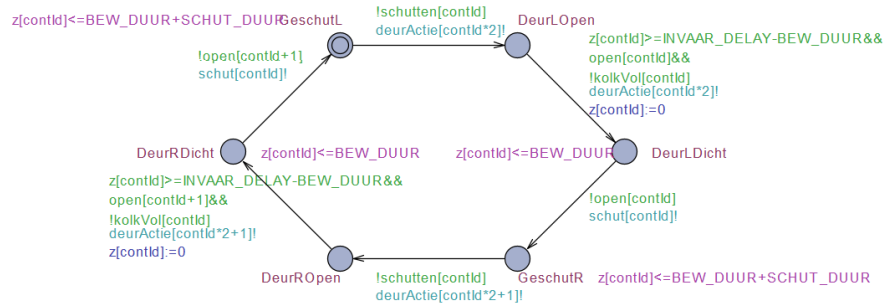
Het model is gerepresenteerd als een Kripke-structuur. Hiervoor is UPPAAL gebruikt. UPPAAL is een programma dat is gemaakt om modellen te maken en te valideren.

Het meest overzichtelijk is om het model van de sluis op te delen in losse onderdelen. Deze onderdelen kunnen dan gecombineerd worden tot een complete sluis. De onderdelen van een sluis zijn de schutkolk, sluiscontroller, sluisdeuren en stoplichten.

7.1 Onderdelen

7.1.1 Sluiscontroller

De sluiscontroller heeft 6 standen: GeschutL, DeurLOpen, DeurLDicht, GeschutR, DeurROpen en DeurRDicht. Deze standen worden ook op deze volgorde geactiveerd om een cyclus van de sluis uit te voeren. Deze cyclus blijft zich herhalen.



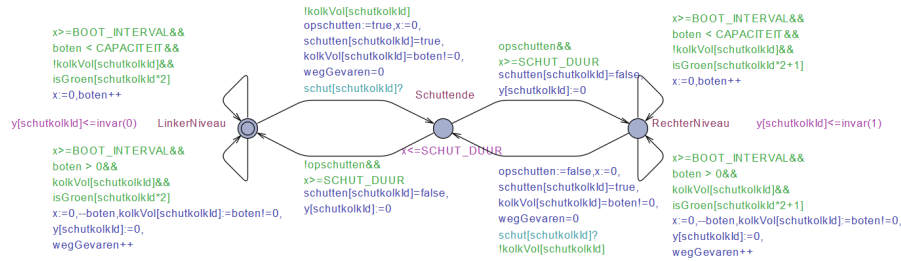
Figuur 8: Model van de sluiscontroller

De sluis start met beide deuren dicht en het water geschut naar het linker waterniveau. Dit is stand 'GeschutL'. Als de schutkolk niet aan het schutten is kan de linker deur opengedaan worden. Dit is stand 'DeurLOpen'. Vervolgens krijgen de boten tijd om de sluis uit en in te varen, en gaat de deur weer dicht na de invaar delay. Dit is stand 'DeurLDicht'. De deuren zijn gesloten na de bewegingsduur, de

sluis begint dan te schutten naar het rechter waterniveau. Dit is stand 'GeschutR'. Als de sluis kolk klaar is met schutten kunnen de rechter deuren geopend worden. Dit is stand 'DeurROpen'. Het proces van links naar rechts werkt hetzelfde als van rechts naar links.

7.1.2 Schutkolk

Een schutkolk heeft 3 standen: LinkerNiveau, Schuttende en RechterNiveau. Als het water in de schutkolk op het linker of het rechter niveau is kunnen boten uit en in de schutkolk varen. Het uit- en invaren van boten kan gedaan worden met transities op de standen van het linker en het rechter niveau. Als de schutkolk schuttende is, kunnen er dus geen boten in- of uitvaren. Het aantal boten dat in de sluis past is afhankelijk van de CEMT-klasse. Deze klasse is in te stellen in de variabelen van de schutkolk.

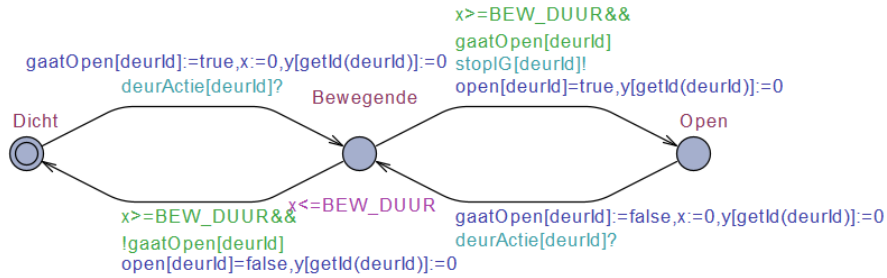


Figuur 9: Model van de schutkolk

Vanaf het linker niveau kunnen boten in de schutkolk varen als het linker stoplicht op groen is en als er plek is in de sluis kolk. (De sluisdeuren worden aangestuurd door de sluiscontroller.) Als de sluiscontroller aangeeft dat de schutkolk moet schutten gaat de schutkolk over in schuttende stand. Na de schut duur is het water op het rechter niveau. Als het rechter stoplicht op groen staat betekent het dat de sluisdeur open staat en dat de boten kunnen vertrekken. De boten moeten eerst vertrekken voordat er nieuwe boten in de schut kolk kunnen.

7.1.3 Sluisdeur

In het model van de sluis zijn altijd twee sluisdeuren aanwezig. Een sluisdeur heeft 3 standen: Dicht, Bewegende en Open.

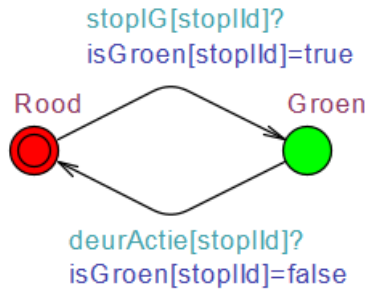


Figuur 10: Model van de sluisdeur

Als de sluiscontroller het signaal geeft om de sluisdeur te openen gaat de deur bewegen. Na de bewegingsduur staat de deur helemaal open. Als de sluiscontroller het signaal geeft om de sluisdeur te sluiten gaat de deur weer dicht.

7.1.4 Stoplicht

In het model van de sluis zijn altijd twee stoplichten aanwezig, een stoplicht per sluisdeur. Een stoplicht heeft 2 standen: Rood en Groen.



Figuur 11: Model van het stoplicht

Het stoplicht gaat op groen als de bijbehorende sluisdeur helemaal open is. Het stoplicht gaat weer op rood als de sluiscontroller de sluisdeur in beweging zet.

7.2 Totaal model

Het model bestaat uit vier verschillende onderdelen: sluisdeur, stoplicht, schutkolk en sluiscontroller. Deze werken samen door transities te synchroniseren. Het stoplicht gaat bijvoorbeeld op groen als de bijbehorende sluisdeur opengaat.

De transities in het model zijn tijdsgebonden. De sluis moet namelijk werken op een tijdschema. Ook kost het tijd om acties uit te voeren zoals de sluisdeuren openen of de sluis schutten. Globaal zijn variabelen aangemaakt om de duur van acties in te

stellen. Zoals de cyclusduur, sluisdeur bewegingsduur, schutduur en de invaarduur. Het model voor de sluis is modulair en makkelijk aan te passen. Het aantal boten dat in de sluis wordt toegelaten wordt bepaald door de CEMT-klasse en kan aangepast worden in de variabelen van de schutkolk. Het is ook mogelijk om meerdere sluizen te maken door dit in de globale declaraties aan te passen.

8 Verifiëren

Het model dat gemaakt is aan de hand van Kripke structuren is op een aantal requirements geverifieerd. Hiervoor zijn ctl(Computation tree logic) statements gebruikt. Omdat niet alle requirements van de sluis te verifiëren zijn aan de hand van ctl, zijn alleen de requirements die wel te vertalen zijn naar ctl geverifieerd. De requirements die niet te verifiëren zijn hebben betrekking tot fysieke aspecten van de sluis of aspecten die niet gemodelleerd zijn. Denk aan de onderhoud, onderhoudskosten en duurzaamheid requirements. De requirements met betrekking tot de capaciteit zijn niet nodig om te verifiëren aangezien dit meteen correct in het model wordt ingebouwd.

De volgende requirements zijn geverifieerd:

1. Sluisdeuren zijn dicht bij op- en neerschutten.
2. Stoplichten staan altijd op rood/groen bij relevante staten van de deur.
3. Deuren staan nooit tegelijkertijd open.
4. De sluis cycled binnen 120 minuten.
5. De sluis cycled niet meer dan nodig.
6. De sluis werkt op basis van een tijdschema.
7. Iedereen mag eerst de sluis uit voordat de sluis weer vol loopt.

De **eerste** requirement is als volgt vertaald naar ctl en geverifieerd:

```
A[ ] Schutkolk(0).Schuttende imply (Sluisdeur(0).Dicht and Sluisdeur(1).Dicht)
```

Het geldt dus altijd dat zodra de schutkolk aan het schutten is, beide sluisdeuren dicht zijn. Als deze uitspraak waar is, kan er vast worden gesteld dat het eerste requirement geverifieerd is.

Het **tweede** requirement is als volgt vertaald naar ctl en geverifieerd:

```
A[ ] Sluisdeur(0).Open imply Stoplicht(0).Groen
A[ ] Sluisdeur(1).Open imply Stoplicht(1).Groen
A[ ] Stoplicht(0).Rood imply (Sluisdeur(0).Bewegende or Sluisdeur(0).Dicht)
A[ ] Stoplicht(1).Rood imply (Sluisdeur(1).Bewegende or Sluisdeur(1).Dicht)
```

Het geldt altijd dat zodra een sluisdeur open is, de bijbehorende stoplicht groen is. Het geldt altijd dat zodra een stoplicht rood is, de bijbehorende sluisdeur bewegend of dicht is. Als beide uitspraken waar zijn, kan er vast worden gesteld dat het

tweede requirement geverifieerd is.

Het **derde** requirement is als volgt vertaald naar ctl en geverifieerd:

```
A[ ] !(Sluisdeur(0).Open and Sluisdeur(1).Open)
```

Het geldt altijd dat beide sluisdeuren nooit tegelijkertijd open zijn. Als deze uitspraak waar is, kan er vast worden gesteld dat het derde requirement geverifieerd is.

Het **vierde**, **vijfde** en **zesde** requirement is als volgt vertaald naar ctl en geverifieerd:

```
A[ ] z[0] <= CYCLE_DUUR
```

Het geldt altijd dat klok z lager of gelijk is aan de $CYCLE_DUUR$ waar klok z bijhoudt hoelang een cycle bezig is en $CYCLE_DUUR$ de totale tijd van een cycle is. Dit betekent dus ook dat de sluis werkt aan de hand van een tijdschema en niet meer cycled dan nodig is. Als deze uitspraak waar is, kan er vast worden gesteld dat het vierde, vijfde en zesde requirement geverifieerd zijn.

Het **zevende** requirement is als volgt vertaald naar ctl en geverifieerd:

```
kolkVol[0] --> !kolkVol[0]
```

Met deze verificatie wordt de liveness van de boten die in de sluis gaan geverifieerd. Zodra er een boot in de kolk van de sluis komt, zal deze boot altijd eruit komen voordat er nieuwe boten in mogen. Als deze uitspraak waar is, kan er vast worden gesteld dat het zevende requirement geverifieerd is.

9 Conclusie

In conclusie is er begonnen met een literatuuronderzoek naar de nederige schutsluis. Er is gekeken naar verschillende aspecten van dit infrastructurele wonder. Uit dit onderzoek zijn hierna eisen opgesteld die gebruikt zijn om een model van een sluis op te bouwen, en daarna richtlijnen te hebben om dit model op te kunnen beoordelen. Deze requirements zijn opgedeeld op basis van veiligheid, efficiëntie, capaciteit, onderhoud, onderhoudskosten en duurzaamheid.

Hierna hebben is er een modulaair model neer gezet van een schutsluis met deze voornoemde eisen in het achterhoofd, die functioneert op een tijdschema. Deze schutsluis beschikt alleen over hetgeen dat ook daadwerkelijk nodig is om een sluis van enige grootte te bedienen. De sluis beschikt over twee deuren, vanzelfsprekend een schutkolk, en signalering in de vorm van stoplichten. Deze onderdelen werken in harmonie samen door middel van het gebruik van een controller, de $SLU15-W8r$.

We hebben voor dit model hierna verificaties geschreven in de vorm van computation tree logic statements. Hiermee hebben wij van ons model succesvol alle eisen kunnen verifiëren die niet gaan over dingen die voor ons buiten de scope

vielen als onderhoud, onderhoudskosten en duurzaamheid. De capaciteit van het model is in ons geval algoritmisch bepaald, en het was voor deze eis niet nodig om additionele verificatie te gebruiken. Uit onze succesvolle verificaties kunnen wij concluderen dat onze sluis voldoet aan de relevante requirements. Het verifiëren van de niet meegenomen eisen zal op een later stadium moeten worden gedaan, in een ander onderzoek. Dit onderzoek kan wel bieden als een richtlijn voor het verder verifiëren van deze eisen.

10 Bijlagen

Referenties

- Arends, G. J. (1994). Sluizen en stuwen: De ontwikkeling van de sluis- en stuwbouw in nederland tot 1940. *TU Delft Research Repository*. Verkregen van <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A2edbe26b-a941-4175-a1e2-fe5182b90003>
- Bezuijen, K. G. (2000). Constructieve waterbouwkunde. deel b: Schutsluizen. *TU Delft Research Repository*. Verkregen van <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:1e45bbca-f816-4659-b0e9-048a53f91b97>
- CEMT. (1992). *Resolution no. 92/2 on new classification of inland waterways*. Verkregen van <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/wat19922e.pdf>
- Corps finds cause of ohio river lock failure — news ...* (2009, Dec). Verkregen van https://www.herald-dispatch.com/news/recent_news/corps-finds-cause-of-ohio-river-lock-failure/article.9ef15d96-07b2-5cfc-ad9d-1ea044ef48b8.html
- GWV. (2020). *Tagarchief: Nieuwe sluis*. Verkregen van <https://www.gwv-bouw.nl/tag/nieuwe-sluis/>
- Maintenance, W. C. (2019). *Geen suggestief onderhoud meer*. Verkregen van <https://www.worldclassmaintenance.com/geen-suggestief-onderhoud-meer>
- Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat & Rijkswaterstaat. (2018). *Werken aan veiligheid bij stormen : onze waterkeringen*. Verkregen van https://puc.overheid.nl/rijkswaterstaat/doc/PUC_162161_31/
- Oosterveld, D. (1976). Sluizen: Sluissimulatie, kanaalsoptimalisatie. *TU Delft Research Repository*. Verkregen van <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:91c8cde2-0708-430f-a736-15f2164b6709>
- Rijkswaterstaat. (2020). *Standaard: Richtlijnen vaarwegen 2020*. Verkregen van <https://standaarden.rws.nl/index.html>
- Rijkswaterstaat. (2021). *Het belang van regulier onderhoud aan bruggen en sluizen: 'iedere tegenvaller voelen we in de portemonnee'*. Verkregen van <https://www.rijkswaterstaat.nl/nieuws/archief/2021/03/het-belang-van-regulier-onderhoud-aan-bruggen-en-sluizen-iedere-tegenvaller-voelen-we-in-de-portemonnee>
- Rijkswaterstaat. (2022). *Dammen, sluizen en stuwen*. Verkregen van <https://www.rijkswaterstaat.nl/water/waterbeheer/bescherming-tegen-het-water/waterkeringen/dammen-sluizen-en-stuwen>
- Rodger, J. (2019, Jul). *Dramatic moment canal boat sinks after owner fails to read warning*. Verkregen van <https://www.birminghammail.co.uk/news/midlands-news/dramatic-moment-canal-boat-sinks-16639055>
- Van Dale. (2022). *Betekenis 'verval'*. Verkregen van <https://www.vandale.nl/gratis-woordenboek/nederlands/betekenis/Verval>
- van Poelgeest, R. (2020). *Risks of structural failure of navigation locks due to drought* (Doctoraalscriptie). TU Delft.

Waterschap Noorderzijlvest. (2021). *Gemalen, stuwen en sluizen*. Verkregen van <https://www.noorderzijlvest.nl/gemalen-stuwen-en-sluizen>
Zeilen. (2013). *Verkeerstekens bij bruggen en sluizen*. Verkregen van <https://www.zeilen.nl/aan-boord/zeemanschap/verkeerstekens-bij-bruggen-en-sluizen/>