

## Summary

Traditionally, maintenance of conveyor belts is performed using corrective maintenance. This means that maintenance to conveyor belts is only performed if the belt fails or severe damage is detected to the belt. Visual inspections to the belt are carried out to detect defects to the belt before the belt fails. Once a belt fails or a defect is detected, maintenance is performed. The amount of maintenance to a system of belts heavily depends on the failures and defects detected. So during a period with little detected defects, the workload is low while the opposite also is true. This leads to a very uneven work load for the department or company performing the maintenance to the belts. Because maintenance is only performed once severe damage is detected or the belt has already failed, the system reliability is lowered. The reliability of the system and the spread of the work load can be improved by using preventive maintenance instead of corrective. Preventive maintenance is performed before severe damage to the belt is present. But how do you know when to perform the preventive maintenance. Performing the maintenance too early will lead to an increase of the number of maintenance actions over time. Performing the maintenance too late and the corrective maintenance has already taken place. Developing a method to determine when the maintenance has to take place, the so called maintenance interval, is the main focus of this research.

To determine the optimum maintenance interval a model has been developed. The model has been designed with conveyor belts into mind but can easily be used on every component that requires preventive maintenance. The model is developed using the Bayesian Belief Network (BBN). Belief networks are graphical representations of models that capture the relationships between the model's variables. The variables that interact directly are identified and are limited to the variables to which they are directly connected. Belief networks may use directed or undirected graphs to represent a dependency model. The directed acyclic graph (DAG) provides a better representation than the undirected graphs. The DAG is also more flexible and is able to represent a wider range of probabilistic independencies. An undirected graph is one where the edges have no direction meaning  $(A, B)$  is equal to  $(B, A)$ . The BBN is a specific type of causal belief network. As for any causal belief network, the nodes represent stochastic variables and the arcs identify direct causal influences between the linked variables. The fundamentals of the Bayesian methodology is too enable prior knowledge of a certain event to calculate the posterior probability of a hypothesis based on the probability of the event.

One of the challenges of the BBN method is incorporating information with a large number of possible values. The thickness of a conveyor belt for example changes of its lifetime because of wear. To take this type of information into account in the model, fuzzy logic is introduced. Fuzzy logic is used to assign a degree of membership to an event. By assigning the thickness of the belt a number of ranges instead of thickness in millimetre, the amount of variations for this node is limited to the number or ranges.

The BBN model is created by using both historical data as the knowledge of experts concerning the part where the model is used for into account. The historical data provide the basic information necessary for the model. The expert opinion can be used to check the information supplied by the historical data as fill in missing data. By introducing reliability of the data and information to the model, the usefulness in practice can be increased. Data for the model determined by a large number of sources and checked by an expert can be considered as reliable. The opposite is also valid and by looking at the reliability of the outcome of the model, the influence of the model on the decision making process can be described. Another factor that is taken into account in the model is the spread in the output. The output of the model will always have an uncertainty that is translated in a spread. This spread can be influenced by the reliability of the model and for example a safety factor for the maintained part in question.

The developed BBN model can provide a boost in both the reliability of the system the part is present in as reducing the fluctuations in the workload for maintenance operations. The workings of the model have been proven with the usage of a test case at the company Tata Steel although the output was not accurate enough to use in practice. Further research is necessary to increase the accuracy of the model to enable the industry to use the method during normal operations.

## Samenvatting

Traditioneel, onderhoud aan transportbanden is uitgevoerd volgens de correctieve methode. Dit houdt in dat onderhoud aan een transportband wordt toegepast zodra een transportband kapot gaat of ernstige schade is gedetecteerd. Visuele inspectie wordt uitgevoerd om schade aan de band te detecteren. Zodra een transportband breekt of schade is vastgesteld, onderhoud aan de band wordt uitgevoerd. De hoeveelheid onderhoud die moet worden uitgevoerd aan een systeem of transport banden wordt sterk beïnvloed door het aantal banden die op dat moment stuk zijn of schade hebben. Dus tijdens een periode met relatief weinig schade gevallen, de hoeveelheid onderhoud dat moet worden uitgevoerd is ook laag. Als er echter veel banden schade hebben, dan is de hoeveelheid werk voor de onderhoudsploeg hoog. Dit leidt tot een sterk variërend aanbod in de hoeveelheid onderhoud werk. Omdat onderhoud alleen wordt uitgevoerd zodra er ernstige schade aan de transportband is gedetecteerd of de band kapot gaat, dit leidt tot een lagere betrouwbaarheid van het systeem. De betrouwbaarheid van het systeem en de spreiding van het onderhoudswerk kan verbeterd worden door preventief in plaats van correctief onderhoud toe te passen. Als preventief onderhoud wordt toegepast, dan vind er onderhoud aan de band plaats voordat er ernstige schade optreedt. Maar hoe weet je wanneer je preventief onderhoud moet toepassen. Als het onderhoud aan de band te vroeg wordt toegepast, dan nemen het aantal onderhoudshandelingen over tijd toe. Als het preventieve onderhoud te laat wordt toegepast, dan heeft er al correctieve onderhoud plaats gevonden. Het vaststellen van het moment waarop preventief onderhoud moet worden toegepast, het onderhoudsinterval, is het hoofddoel van dit onderzoek.

Om het optimale onderhoudsinterval te bepalen is er een model ontwikkeld. Dit model is ontwikkeld met als uitgangspunt transportbanden, maar kan zonder enige problemen worden toegepast op elk ander onderdeel dat preventief onderhoud nodig heeft. Het model is ontwikkeld met gebruik van het Bayesian Belief Network (BBN). Belief networks zijn grafische weergave van modellen dat de relaties tussen variabelen in het model weergeven. De variabelen die onderling communiceren worden geïdentificeerd en zijn gelimiteerd tot de variabelen met wie zij direct verbinden. De gerichte acyclische graaf, in het Engels directed acyclic graph (DAG), levert een beter beeld dan een ongerichte graaf. De DAG is ook flexibeler en kan een groter assortiment van statische onafhankelijkheden. Een ongerichte graaf heeft kanten met geen richting dus (A,B) is gelijk aan (B,A). De BBN is a specifiek type van causal belief network. Als voor elk causal belief network, de knopen representeren de stochastische variabelen en de kanten representeren de directe causaal verbanden tussen de verbonden variabelen. Het basisprincipe van de Bayesian methodologie is om met behulp van voorkennis of bepaalde gebeurtenissen de posterior probability van een hypothese te bepalen in relatie tot een gebeurtenis. Een van de uitdagingen wanneer de BBN methode wordt toegepast is het gebruiken van informatie die een grote hoeveelheid variaties heeft. De dikte van een transportband bijvoorbeeld zal gedurende de levensduur van de band veranderen onder de invloed van slijtage. Om dit type van informatie toe te passen, fuzzy logic kan worden gebruikt. Fuzzy logic wordt gebruikt om een gewicht toe te wijzen aan waarden. Als bijvoorbeeld aan de dikte van een transportband een aantal waarden toegekend in plaats van in millimeters, het aantal variaties voor dit knooppunt is gelimiteerd tot het aantal toegekende waarden.

Het BBN model is gemaakt met behulp van zowel historische data als de kennis van experts op het gebied van het te moduleren onderdeel. De historische data wordt gebruikt voor het bepalen van de benodigde informatie voor het model. De kennis van de experts kan worden gebruikt om de juistheid van de informatie verzameld met behulp van de historische data te controleren en missende informatie voor het model in te vullen. Met behulp van het introduceren van betrouwbaarheid van zowel de data als de informatie beschikbaar, de bruikbaarheid van het model in de praktijk kan worden verbeterd. Data verzameld met behulp van een groot aantal bronnen en gecontroleerd aan de hand van de kennis van experts kan worden beschouwd als betrouwbaar. Het tegenovergestelde is ook van toepassing, met behulp van deze betrouwbaarheid kan een niveau van vertrouwen over de uitkomst van het model worden toegevoegd welke tijdens het beslissingsproces kan worden gebruikt. Een andere factor die moet worden bepaald in het model is de spreiding van de uitkomst. De uitkomst van het model zal altijd een zekere mate van onzekerheid bevatten, dit wordt toegepast met behulp van de spreiding. Deze spreiding kan worden beïnvloed door de betrouwbaarheid van het model en het veiligheid niveau van het onderdeel waarop het model wordt toegepast.