

Ondersteuningssystemen voor verwerking en verdichting - waarom zijn ze niet op elke bouwplaats aanwezig?

ing. Thalia Johanna Pilataxi Araujo
Universiteit Twente

dr. ir. S.R. Miller
Universiteit Twente

ir. D. Makarov
Boskalis Nederland Infra B.V.

prof. dr. ir. A.G. Dorée
Universiteit Twente

Corresponderende auteur: s.r.miller@utwente.nl

Samenvatting

Ondersteuningssystemen voor verwerking en verdichting zijn voornamelijk ontwikkeld om machinisten te helpen bij hun taken. Deze hightechoplossingen zijn door de jaren heen geëvolueerd met de nieuwste systemen die ondersteunende verwerkings- en verdichtingsgegevens in real-time leveren met behulp van intelligente digitale apparaten en sensoren. Daarom is het verzamelen, opslaan, documenteren en analyseren van verwerkingsgegevens in real-time aanzienlijk toegenomen. Ondanks de voordelen die dergelijke technologieën bieden, lijkt de acceptatie ervan in de meeste landen achter te blijven. Dit paper rapporteert dus de state-of-the-art van verwerkings- en verdichting ondersteuningssystemen die wereldwijd worden gebruikt voor asfaltconstructies.

Er wordt een desk-study uitgevoerd met als doel de ontwikkeling van verhardings- en verdichting ondersteuningssystemen en hun implementatie binnen de regelgeving van enkele Europese, Noord-Amerikaanse en Zuid-Amerikaanse landen te verkennen. De informatie wordt gebruikt om de factoren en belemmeringen voor de implementatie van deze hightechoplossingen te analyseren. De studie toont aan dat veel beschikbare oplossingen op de markt aanzienlijke voordelen bieden op het gebied van gebruiksvriendelijkheid, assistentie aan de machinisten, verhoogde productiviteit, verlaging van de onderhoudskosten van wegen en verbeterde prestaties van het wegdek op de lange termijn. De introductie van dergelijke technologieën in sommige landen is echter achtergebleven, wat wordt beïnvloed door barrières zoals extra opleidingskosten, hogere systeemkosten, verwerking en verdichting die als gescheiden systemen worden behandeld, gesloten systemen voor integratie en problemen die verband houden met het veranderen van de mentaliteit van de machinist. Over het algemeen bieden de resultaten van dit onderzoek stof tot nadenken voor het versnellen van de implementatie en grootschalige toepassing van ondersteuningssystemen voor verwerking en verdichting.

Keywords: asfalt, verdichting, ondersteuning, machinisten, voorschriften, barrières

1. *Introductie*

Bij de aanleg van wegen zijn er twee hoofdactiviteiten: verwerking en verdichting [1]. In het verwerkingsproces bereikt de spreidmachine een voorverdichtingsniveau dat kan worden beïnvloed door heterogeniteit van het mengsel (vanwege samenstelling en temperatuur), snelheidsvariëaties, variëaties in laagdikte en aanpassingen van de balk [2]. Dit voorverdichtingsniveau heeft gedeeltelijk invloed op het uiteindelijke verdichtingsniveau, dat voornamelijk wordt bepaald door de wals. Het verdichtingsproces verwijst naar het luchtvolume in een mengsel dat wordt verminderd door externe krachten uit te oefenen. Daardoor neemt het mengsel minder volume in, waardoor de dichtheid en stijfheid in asfaltverhardingen toenemen. Factoren zoals variëatie in materiaaleigenschappen, vochtgehalte en stijfheid van de onderliggende laag kunnen niet worden gecontroleerd door de machinist [3]. Als gevolg hiervan wordt mogelijk geen homogeen verdichtingsresultaat bereikt en zullen bepaalde gebieden over- of onderverdicht worden. Eerdere studies hebben twee beheersbare parameters aan het licht gebracht die de kwaliteit van asfalt kunnen beïnvloeden: de dynamiek van de verdichting (d.w.z. het aantal wals overgangen en de manier van walsen) en asfalttemperatuur [4]. Traditioneel bepalen machinisten dergelijke parameters echter op basis van eerdere ervaring en vuistregels, die suboptimaal zijn gebleken. Na het verdichtingsproces worden in-situ steekproeven (bijv. kernboren) uitgevoerd voor kwaliteitscontrole (Quality Control [QC]) en kwaliteitsborging (Quality Assurance [QA]); beide zijn cruciaal voor het bereiken van een acceptabele bouw kwaliteit [5]. Er zijn echter nadelen verbonden aan conventionele in-situ-spottesten [5-7]: (1) de verdichtingskwaliteit van de hele weg kan niet worden weergegeven omdat de tests discreet worden uitgevoerd op beperkte locaties; (2) sommige tests kunnen destructief zijn voor de verdichte laag door scheuren en kuilen te veroorzaken; (3) het uitvoeren van in situ metingen is arbeidsintensief aangezien de tests één voor één handmatig moeten worden uitgevoerd; en (4) de tests zijn tijdrovend en worden uitgevoerd nadat de verdichting is beëindigd; daarom kan er geen real-time verdichtingsinformatie worden verstrekt. Door het gebrek aan real-time feedback en controle is er dus een gemiste kans om de verdichtingskwaliteit te verbeteren door bij de eerste poging een optimale verdichting te bereiken [6]. Daardoor kunnen de problemen die worden veroorzaakt door het gebruik van vakmanschap en traditionele (impliciete) praktijken voor de wegenbouw, leiden tot een afname van de prestaties van het wegdek op de lange termijn en tot hogere levenscycluskosten [7].

2. *Evolutie van ondersteuningssystemen voor verwerking en verdichting*

Er zijn high-tech oplossingen ontwikkeld om de ingebedde problemen van conventionele praktijken en apparatuur aan te pakken. Als gevolg hiervan heeft de wegenbouwindustrie de afgelopen decennia technologische ontwikkelingen doorgemaakt, die in het volgende hoofdstuk zullen worden bestudeerd.

2.1. Het historische spoor van de ontwikkelingen in de asfalt wegenbouw

In de jaren 70 waren de eerste onderzoeken voor het verkrijgen van informatie over de stijfheid/modulus van de verdichte lagen door middel van wals-geïntegreerde metingen het begin van een vitaal ontwikkelingstijdperk [8]. Het volgende decennium was het begin van de systeemontwikkeling voor asfaltverharding en verdichting. Machinisten moesten handmatig de verdichtingsgegevens invoeren die moesten worden opgeslagen en geanalyseerd met behulp van algoritmen [1]. In de jaren 90 nam de implementatie van apparaten en sensoren in bouw machines toe, die vooral zorgden voor de positionering van spreidmachine en walsen. Later markeerde de Intelligent Compaction (IC)-trend een cruciaal nieuw tijdperk van ontwikkeling, beginnend in 2000. Vanaf dit jaar richtten onderzoekers zich op het ophalen van informatie van de wals door sensoren en voorspellingsalgoritmen voor mengseldichtheid en het aantal walsgangen op te nemen. In het laatste decennium was het onderzoek gericht op het verkrijgen van de temperatuur

van de asfaltlaag, het documenteren van de dichtheid van de asfaltlaag en het faciliteren van communicatie tussen machines. Tegenwoordig ligt de focus op het ontwikkelen van real-time procesbesturingssystemen.

2.2. Ondersteuningssystemen voor verdichting van grond en asfalt

Een uitgebreid bestudeerde technologie is Intelligent Compaction (IC) of Continuous Compaction Control (CCC). De termen CCC en IC worden respectievelijk gebruikt in Europa en de Verenigde Staten [9]. CCC/IC zijn op trillingen gebaseerde technologieën die het verdichtingsniveau tijdens de bouw meten. Een van de belangrijkste componenten is de Compaction Control Index (CCI) of Intelligent Compaction Measurement Value (ICMV). Omdat er geen standaardmaat voor het rapporteren van verdichtingsresultaten is vastgesteld, hebben fabrikanten verschillende meetwaarden (MV's) ontwikkeld. Veel studies hebben de relatie van verdichtings-MV's van grond en asfalt tot spottestmetingen geëvalueerd, aangezien asfalt en grond verschillende eigenschappen hebben. Dergelijke studies waren bedoeld om de haalbaarheid van CCC/IC voor QC- en QA-doeleinden aan te tonen. Enerzijds zijn er veel solide lineaire correlaties gevonden tussen MV's en verschillende soorten bodempuntmeetwaarden (Punt-MV's) [10]. De belangrijkste factor die deze correlaties beïnvloedt, is heterogeniteit in ondersteuningscondities van lagen die onder de verdichte bodemlaag liggen. De verkregen correlaties suggereren dat CCC/IC kan worden gebruikt om zwakke gebieden te identificeren in plaats van de acceptatie door de bodem te bepalen [6]. Aan de andere kant hebben weinig studies goede correlaties aangetoond tussen MV's en asfalt Point-MV's, vanwege verschillende factoren [10]: (1) de meetdiepte van CCC/IC-metwaarden is groter dan de asfaltlaagdikte; vandaar dat de gemeten waarden op de toplaag worden beïnvloed door de stijfheid van de onderliggende lagen; (2) CCC/IC-metwaarden zijn afhankelijk van de asfalttemperatuur. Door de afkoeling van asfalt tijdens het verdichten zal de stijfheid continu veranderen; en (3) ICMV wordt beïnvloed door werkparameters van de wals, zoals amplitude of frequentie. Over het algemeen hebben de slechte correlaties tussen CCC-waarden/ICMV's en asfalt Point-MV's het gebruik van dergelijke systemen op grote schaal beperkt. Bijgevolg is meer onderzoek nodig als de asfaltverdichtingsgegevens moeten worden gebruikt voor QC- en QA-doeleinden in plaats van ter plaatse testgegevens.

2.3. De huidige trend van "op de markt" beschikbare oplossingen

Het gebruik van hightech-oplossingen heeft geleid tot een opkomende technologische revolutie binnen de wegenbouwsector waarin het verzamelen, opslaan, documenteren en analyseren van gegevens op de bouwplaats in real-time opmerkelijk is toegenomen [11]. Deze revolutie is het resultaat van de vooruitgang in telematica en machinebesturing, met name op walsen. De laatste jaren maken echter ook spreidmachines, graders, bulldozers, graafmachines en vrachtwagens gebruik van deze technologieën. Telematica wordt gedefinieerd als het verzamelen van gegevens, het organiseren ervan voor projectbeheer en machinecontrole en het optimaliseren van de machines. Machinebesturing verwijst naar de controle en besturing van apparatuur ter plaatse. Beide technologieën bieden zowel aannemers als opdrachtgevers tal van voordelen. Huidige interfaces geven bijvoorbeeld alleen relevante informatie weer, of de informatie die de machinist vraagt; daarom zijn de beschikbare systemen gebruiksvriendelijk. Deze technologieën bieden ook assistentie aan de machinisten door de gegevens in real-time vast te leggen en aan hen te presenteren. Omdat machinisten bovendien real-time gegevens kunnen verkrijgen, worden wegenbouwwerkzaamheden efficiënter uitgevoerd. Daardoor wordt de productiviteit geoptimaliseerd door de hoeveelheid wegmateriaal die op een productiedag wordt aangelegd, te vergroten. Evenzo stellen de gepresenteerde gegevens machinisten in staat om corrigerende "just in time" -acties te ondernemen in het geval van suboptimale verwerkings- en verdichtingsprocessen. Zo worden storingen op het bouwplaats geminimaliseerd en leidt de efficiëntie van

bouwwerkzaamheden tot een hogere algehele kwaliteit en een verlaging van de onderhoudskosten van wegen voor aannemers, verantwoordelijke autoriteiten en het reizend publiek. Over het algemeen zijn de bijbehorende voordelen aanzienlijk; daarom zullen degenen die de veranderingen omarmen, profiteren van deze revolutie en degenen die dat niet doen, overtreffen [11].

3. Richtlijnen en voorschriften voor wegebouw

In enkele landen zijn richtlijnen en voorschriften ontwikkeld voor het toepassen van ondersteuningssystemen voor verwerking en verdichting. Om te begrijpen waarom, zullen richtlijnen en voorschriften uit Europese, Noord-Amerikaanse en Zuid-Amerikaanse landen worden geanalyseerd. Ook wordt gekeken naar de huidige focus (met betrekking tot wegebouw) uit landen die dergelijke regelgeving niet hebben aangenomen.

3.1. Europa

Alleen Duitsland en Oostenrijk hebben voorschriften voor hightechoplossingen aangenomen, zoals tabel 1 laat zien. In de andere bestudeerde landen kunnen twee situaties worden aangetoond: (1) terwijl ze nog steeds voornamelijk conventionele praktijken en apparatuur gebruiken, testen sommige landen systemen voor ondersteuning van verwerking en verdichting voordat ze formeel worden opgenomen in hun regelgeving voor kwaliteitscontrole (QC) en kwaliteitsborging (QA). ; en (2) andere landen gebruiken alternatieve hightechtechnologieën om de algehele kwaliteit van aangelegde asfaltlagen te verbeteren. Hoewel de kwaliteit van de wegen in Europese landen over het algemeen goed is, willen wegbeheerders steeds vaker efficiënter en slimmer wegeninfrastructuur aanleggen, onderhouden en monitoren; dus worden er meer "digitale" eisen geïntroduceerd. Daardoor is er een toename in de ontwikkeling van innovatieve technologieën op de Europese markt, die bouwbedrijven over het algemeen kunnen gebruiken.

Table 1: Richtlijnen en voorschriften in Europa

Land	R/V ¹	Huidige trend
Frankrijk	Nee	De overheid richt zich op het onderhoud van wegen. Daarom zijn technologieën zoals IRQN geïmplementeerd, een index die de verslechtering van asfaltverhardingen beoordeelt door middel van een LIDAR-onderzoek, tools voor automatische detectie van degradaties en classificatie-algoritmen [12].
Spanje	Nee	Tegenwoordig wordt er door de overheid weinig geïnvesteerd in wegenonderhoud en wegebouw [13]. Daarom is het nodig om efficiëntere en intelligentere technologieën te implementeren voor de aanleg, het onderhoud en de controle van de wegeninfrastructuur.
Duitsland	Ja	Er is een hoog kennisniveau en hogere eisen aan de aanleg van wegen. CCC-voorschriften worden toegepast op korrelige materialen (ondergrond en dijkbodems) en worden op twee manieren gespecificeerd [8]. De eerste benadering omvat de kalibratie van MV's en spot-tests, en een dergelijke correlatie kan worden gebruikt voor QA. De tweede benadering verwijst naar het identificeren van zwakke gebieden met behulp van CCC, dat dient voor spottests.
Italië	Nee	De overheid past andere technologieën toe, zoals de Falling Weight Deflectometer (FWD), die de eigenschappen van het wegdek bepaalt [14]. Met negen sensoren kan de doorbuiging worden gemeten rond het aangrijpingspunt van een dynamische belasting. De verzamelde informatie wordt verwerkt door software die gegevens geeft over de resterende levensduur en onderhoudsindicaties van de verharding.
Verenigde Koninkrijk	Nee	Over het algemeen kunnen de aannemers CCC gebruiken; het gebruik ervan kan echter worden gestimuleerd door voorschriften te implementeren. Dergelijke voorschriften kunnen worden ontwikkeld en verfijnd met belangrijke infrastructuurprojecten die CCC-mainstream kunnen maken [15].
Griekenland	Nee	De overheid richt zich op uitbreiding, verbetering en modernisering van de bestaande infrastructuur [16]. Aangezien er draagvlak is voor onderzoek en innovatie in de infrastructuursector, zou de implementatie van nieuwe technologieën voor de wegebouw de komende jaren een impuls kunnen krijgen.
Portugal	Nee	Er is behoefte aan instandhouding en herstel van de bestaande wegeninfrastructuur van Portugal. Het is voornemens dergelijke problemen aan te pakken door nieuwe technologieën te implementeren; ze vereisen echter meer onderzoek voordat ze worden gestandaardiseerd [17].

¹ Richtlijnen/Voorschriften

Oostenrijk	Ja	CCC wordt als state-of-the-art beschouwd vanwege onderzoeksprojecten, die het gebruik en de toepasbaarheid ervan hebben vergroot en bevorderd. CCC-voorschriften worden toegepast op korrelige materialen (ondergrond, basis en gerecyclede materialen), en ze maken twee benaderingen mogelijk [8]: (1) de correlaties ontwikkeld tussen MV's en spot-tests voor acceptatietesten; en (2) de verdichtingswerkzaamheden moeten worden uitgevoerd totdat het gemiddelde van de MV's van de wals minder dan 5% hoger is dan de gemiddelde MV's van de vorige doorgang.
Nederland	Nee	Onderzoek en implementatie van hightech oplossingen is gaande vooral door de lange-termijn ASPARi netwerk. De adoptie van nieuwe contractvormen heeft hier invloed op gehad, zoals de DBFM en EMVI-contractvormen [18]. Opdrachtnemers kunnen de meest geschikte middelen inzetten om te voldoen aan de prestatievoorschriften van de opdrachtgever. Er is dus ruimte voor innovatie door creatieve ontwerp- en bouwmethoden.

3.2. Noord-Amerika

IC is de meest erkende hightech-oplossing in Noord-Amerika. Tabel 2 laat zien dat in de VS IC-voorschriften voor grond en asfalt zijn vastgesteld. Aanvankelijk beperkte een gebrek aan ervaring, het gebrek aan kennis en het tekort aan beschikbare IC-apparatuur de implementatie ervan voor Department of Transportation (DoT) en bouwbedrijven. Als gevolg hiervan heeft deze technologie een verfijningsproces ondergaan, voornamelijk bij gebruik voor asfaltverdichting. De IC-implementatie kreeg een boost met de introductie van generieke IC-voorschriften. Door middel van workshops en demonstratieprojecten heeft de samenwerking van FHWA, DOT's, aannemers, leveranciers, adviesbureaus en de academische wereld in de loop der jaren een grootschalige opschaling van dergelijke voorschriften mogelijk gemaakt. Evenzo heeft Canada de afgelopen jaren geprobeerd IC-systemen te implementeren in navolging van het voorbeeld van de VS, omdat er meer efficiëntie gewenst is bij toekomstige banen op de snelweg. Geen van de provincies heeft echter tot nu toe significant onderzoek gedaan naar deze technologie. Ook wordt er in Mexico geen onderzoek naar IC-systemen gedaan, wat mogelijk verband houdt met de lage investeringen in het onderhoud en de aanleg van wegen.

Table 2: Noord-Amerika

Land	R/V	Huidige trend
Verenig de Staten	Ja	<p>Verenigde Staten - Intelligente walsen: IC-walsen zijn trilwalsen die real-time parameters registreren met een geïntegreerd meetsysteem, computerrapportagesysteem, een op Global Positioning System (GPS) gebaseerde mapping en optionele feedbackcontrole [19].</p> <p>Intelligent Compaction Measurement Value (ICMV): De term is bedacht door de Federal Highway of Administration (FHWA), en deze waarde vertegenwoordigt de stijfheid van de verdichte laag [10].</p> <p>Generieke IC-voorschriften voor bodem en asfalt: De generieke voorschriften zijn vergelijkbaar voor grond en asfalt en verwijzen voornamelijk naar [20] [21]:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Benodigde apparatuur: IC-walsen zijn nodig samen met het gebruik van de gestandaardiseerde analysesoftware Veta (voorheen bekend als Veda). 2. Kwaliteitscontroleplan (Quality Control Plan [QCP]): Er moet een schriftelijk QCP voor het project worden opgesteld en ingediend. QCP geeft aan hoe de controleactiviteiten worden uitgevoerd en welke experts erbij betrokken zijn. Verder moet het de procedures bevatten voor het nemen van monsters en het testen van het wegdek, en ook hoe het testen van GPS-controles moet worden uitgevoerd. Daarnaast wordt geadviseerd om vooraf in kaart te brengen van bestaande ondersteuningsmaterialen om zwakke plekken te identificeren. 3. IC-constructie: De vertegenwoordigers van de IC-wals zullen technische assistentie ter plaatse bieden. Bovendien moet er training op locatie worden gegeven aan het betrokken personeel. Evenzo moeten IC-constructiegebieden de minimale dekking, het optimale aantal rolpassages en de beoogde IC-MV's bereiken of overschrijden. 4. Meetmethode: IC wordt niet gemeten (bv. hoeveelheid wals passages) omdat het wordt betaald tegen de vaste prijs van het contract. 5. Betalingsgrondslag: De oprichting van IC zal worden betaald tegen de vaste prijs van het contract. <p>Staat IC-voorschriften: Ze zijn gebaseerd op de generieke voorschriften; de DoT's van elke staat kunnen de generieke voorschriften aanpassen aan hun behoeften.</p>
Canada	Nee	Canadese provincies hebben hun eigen voorschriften voor wegenbouw aangenomen. Geen enkele verwijst echter naar hightech-oplossingen. Dit kan het gevolg zijn van het toepassen van 'Eindproductvoorschriften' waarbij de aannemer verantwoordelijk is voor QC en de Wegenbeheerder voor QA [22].
Mexico	Nee	Vanwege de slechte staat van wegen zijn aanzienlijke economische investeringen nodig om ze te reconstrueren of te herstellen met betere materialen en nieuwe technieken [23]. Momenteel zijn er echter weinig publieke en private investeringen in de bouwsector.

3.3. Zuid-Amerika

Het adopteren van een nieuwe technologie vormt een technologische en organisatorische uitdaging voor Zuid-Amerikaanse landen, aangezien de technologie moet worden aangepast aan de omstandigheden in het land waarin deze wordt geïntroduceerd. Tabel 3 laat zien dat IC een zeer erkende technologie is in deze landen, waarin twee situaties kunnen worden gevonden: (1) Argentinië, Brazilië, Colombia, Chili en Peru hebben geen IC-voorschriften geïmplementeerd. Toch zijn er verschillende onderzoeken en projecten uitgevoerd naar het gebruik van deze technologie, waaruit blijkt dat deze landen bereid zijn meer kennis op te doen voor toekomstige implementatie; en (2) het IC-concept is relatief onbekend voor de andere landen. Bolivia, Paraguay en Ecuador hebben aanzienlijke investeringen gedaan in wegeninfrastructuur. Sommige van de voltooide projecten hebben echter na slechts een paar jaar gebruik ernstige en gevaarlijke verslechtering laten zien, omdat er weinig aandacht wordt besteed aan de kwaliteit van de wegen. Evenzo heeft Venezuela helemaal niet geïnvesteerd in wegeninfrastructuur; daarom is de kwaliteit van de weg in de loop der jaren verslechterd. Dit benadrukt de cruciale rol van wegbeheerders en hoe investeringen een enorm verschil kunnen maken in de algehele wegwkwaliteit.

Table 3: Zuid-Amerika

Land	R/V	Huidige trend
Brazilië	Nee	Fabrikanten van hightechoplossingen commercialiseren hun producten omdat ze over lokale productiefaciliteiten beschikken [24]. Dit lost problemen op zoals technische assistentie en levering van onderdelen; klanten hebben dus meer vertrouwen in de aanschaf van IC-systemen. IC bevindt zich echter nog in een introductieperiode omdat de klant eerst moet begrijpen hoe de technologie werkt en wat de voordelen zijn.
Argentinië	Nee	Het IC-concept wordt algemeen erkend; daarom heeft de regering gesuggereerd dat bouwbedrijven dit soort technische bijstand voor verdichtingswerken kunnen toepassen [25]. Toch zullen dichtheidswaarden die in aanmerking komen voor goedkeuring altijd afkomstig zijn van geboorde kernen uit het voltooide gedeelte.
Peru	Nee	De toepassing van hightech-oplossingen uit andere landen vormt een organisatorische en technologische uitdaging, aangezien ze moeten worden aangepast aan de omstandigheden in Peru [26].
Colombia	Nee	Geen enkele IC-adoptie is een uitdaging omdat het niet is gestandaardiseerd of gereguleerd door autoriteiten [27]. Het gebrek aan implementatie van IC toont aan dat dit een economisch, intergenerationeel, sociaal en politiek probleem is. Enige zorgen over IC zijn de extra kosten met betrekking tot importheffingen, nationalisatie en transport naar Colombia en de extra training die nodig is voor machinisten en technici. Er is gesuggereerd om test strips (pilots) uit te voeren, waarbij conventionele en IC-apparatuur worden vergeleken om de voordelen van het gebruik van IC aan te tonen.
Bolivia	Nee	De afgelopen jaren is er flink geïnvesteerd in wegenonderhoud en onderzoek [28]. De meeste afgeronde projecten kampen echter met ernstige problemen omdat ze niet binnen de beschikbare tijd en het beschikbare budget worden afgerond.
Venezuela	Nee	Investeringen in wegen en transport hebben historisch gezien weinig aandacht gekregen [29]. De basis van dit probleem heeft meerdere elementen: decentralisatie, een gebrek aan capaciteit van de overheid naar de deelstaten en een gebrek aan planning en regelgeving met betrekking tot wegeninfrastructuur, resulterend in een ongelijkheid in wegwkwaliteit tussen staten en instabiliteit in de investeringen voor wegen.
Chile	Nee	Verdichtingsactiviteiten in de mijnbouw zijn belangrijk voor dit land. Zo worden in deze sector enkele hightechnologische oplossingen voor bodemverdichting gebruikt. De lichtgewicht penetrometer PANDA maakt bijvoorbeeld bodemverdichtingscontrole van de wegeninfrastructuur en opvulprojecten mogelijk [30]. Enkele demonstratieprojecten zijn uitgevoerd om de voordelen van nieuwe technologieën in asfaltverwerking te demonstreren.
Paraguay	Nee	Paraguay heeft flink geïnvesteerd in de aanleg van wegen. De connectiviteit (het aantal wegen dat wordt aangelegd) heeft echter prioriteit gekregen in plaats van de kwaliteit van de wegen [31]. Onlangs is een technologiecentrum geopend om wegeninfrastructuur van goede kwaliteit te ontwikkelen, onderzoek naar innovatieve technologieën en opleiding van Paraguayaanse wegengineers en technici mogelijk te maken.
Ecuador	Nee	In het verleden heeft de Ecuadoraanse overheid aanzienlijk geïnvesteerd in wegeninfrastructuur, wat resulteerde in een betere kwaliteit van de transportinfrastructuur [32]. Het huidige kabinet heeft deze investeringstrend niet doorgezet. Daardoor is de algehele kwaliteit van de wegen afgenomen.

4. Enablers en barrières van hightech oplossingen in de asfalt wegenbouw

Na het uitvoeren van een literatuuronderzoek werden de factoren en belemmeringen voor het toepassen van ondersteuningssystemen voor verwerking en verdichting geïdentificeerd door middel van interviews met Nederlandse experts. De geanalyseerde factoren waren verhoogde productiviteit, verlaging van de onderhoudskosten van wegen, assistentie aan de machinisten en gebruiksvriendelijke systemen. De geanalyseerde belemmeringen waren aanvullende training, hogere systeemkosten, gesloten systemen voor integratie en paving en verdichting worden behandeld als gescheiden processen. Dergelijke factoren en belemmeringen zijn beoordeeld in negen gestructureerde interviews (met zeven aannemers en twee fabrikanten); de geïnterviewden werd gevraagd een score te geven binnen een bereik van 1 tot 9 voor elke enabler en barrière. Hoe hoger de score, hoe kritischer de enabler of barrière. Na het afnemen van de interviews werd reductie in onderhoudskosten van wegen en gesloten systemen voor integratie vastgesteld als respectievelijk de belangrijkste enabler en barrière. Tegelijkertijd legden de interviews de nadruk op andere factoren en barrières die niet eerder werden genoemd, zoals de lange-termijnprestaties van de verwerking (een enabler) en de traditionele manier van denken van machinisten (een barrière). Daarom was het noodzakelijk om de eerder verkregen resultaten te valideren. Deze validatie werd gedaan door toepassing van een multi-criteria besluitvormingsmethode (MCDM) genaamd Best-Worst Method (BWM) [33]. MCDM is een robuuste paarsgewijze vergelijkingstechniek die het mogelijk maakte om de factoren en barrières te rangschikken op basis van hun belang. Hoe hoger het gewicht, hoe belangrijker de enabler/barrière. Evenzo wordt een consistentieverhouding (CR) voorgesteld voor de BWM. De CR is een robuuste index van 0 tot 1 en vertegenwoordigt het consistentieniveau van de verkregen resultaten. Hoe hoger de CR, hoe minder consistent de vergelijkingen zijn, waardoor de resultaten minder betrouwbaar zijn. De input voor de BWM is verkregen uit twee workshops met vijf deelnemers (vier aannemers en één expert op het gebied van wegenbouw). Uit de resultaten na toepassing van de BWM bleek dat de prestaties van de verwerking op de lange termijn de belangrijkste factor zijn. De CR-waarde was 0,0972, wat bijna nul is, wat wijst op de hoge betrouwbaarheid van de resultaten. Aan de andere kant zijn gesloten systemen voor integratie de meest kritische barrière voor de grootschalige implementatie van hightech-oplossingen in de wegenbouwindustrie. De CR-waarde was 0,1426; dus de resultaten zijn zeer betrouwbaar.

5. Eerste conclusies

Hightech-oplossingen voor asfaltconstructies zijn wereldwijd beperkt geaccepteerd en alleen de Verenigde Staten, Duitsland en Oostenrijk hebben voorschriften voor deze technologieën opgesteld. Wegenbeheerders hebben de implementatie ondersteund en geholpen bij het oplossen van inherente problemen met betrekking tot de goedkeuring ervan. Daarentegen zijn twee trends vastgesteld in landen die dergelijke regelgeving niet hebben geïmplementeerd. Enerzijds gebruiken sommige landen alternatieve technologieën in combinatie met traditionele bouwmethoden en is de algehele kwaliteit van de wegen acceptabel. Er is dus weinig prikkel om te veranderen. Dat gezegd hebbende, hebben de toenemende "digitale" eisen en de waargenomen voordelen van dergelijke investeringen ertoe geleid dat deze landen investeren in onderzoek en innovatie. Aan de andere kant worden landen die suboptimale praktijken en apparatuur gebruiken voor wegenbouw, meestal blootgesteld aan slechte wegkwaliteit. Ze zouden kunnen profiteren van een of andere vorm van regulering of wijziging van contractvoorwaarden die de implementatie van hightechoplossingen aanmoedigt om de algehele wegkwaliteit te verbeteren.

De belangrijkste factor voor het implementeren van hightech-oplossingen voor asfaltconstructies zijn de prestaties van de wegverharding op de lange termijn, omdat ze een vermindering van de variabiliteit tijdens het bouwproces mogelijk maken door gegevens in real-time te verzamelen, visualiseren en analyseren, en daarom machinisten bij hun taken ondersteunen. Het is van cruciaal belang om de mogelijkheden van deze technologieën uit te breiden door demonstratieprojecten uit te voeren en organisaties te ondersteunen die zich inzetten voor onderzoek naar nieuwe technologieën voor de wegenbouw. De meest kritische barrière voor het implementeren van

hightech-oplossingen voor asfaltconstructies zijn echter gesloten systemen voor integratie. Dit verwijst naar systemen die niet kunnen worden geïntegreerd met andere systemen; ze zijn niet interoperabel. Deze barrière is belangrijk omdat telematica en machinebesturing een cruciale rol spelen bij het verzamelen van gegevens in real-time. Daarom moeten fabrikanten hun systemen openstellen en gegevensoverdracht en communicatie tussen verschillende machinetypes mogelijk maken. Evenzo is het van cruciaal belang om te focussen op de andere barrières, zoals het veranderen van de mentaliteit van machinisten. De ontwikkelde systemen moeten aantrekkelijk, gemakkelijk te gebruiken en te interpreteren zijn. Alleen dan zullen ze bereid zijn om dergelijke technologieën te gebruiken. Een andere belemmering is de aanvullende opleiding die nodig is voor machinisten, die kan worden aangepakt door middel van formele beroepsopleiding, aanvullende opleiding op de werkplek en technische assistentie ter plaatse. Ten slotte vormen de kosten van beschikbare oplossingen een uitdagende barrière, vooral voor kleine bedrijven. Daarom is het essentieel om de systemen betaalbaarder te maken.

6. *Discussie*

Ondersteuningssystemen voor verdichting zijn niet nieuw. Continuous Compaction Control (CCC)-systemen die voor het eerst werden geïntroduceerd in de jaren 70, boden kansen om de bodemverdichting aanzienlijk te verbeteren. Momenteel zijn normen, voorschriften en metrieken geavanceerd en algemeen aanvaard. Indicatoren voor bodemverdichting zijn eenvoudig te bepalen en kalibratie wordt als eenvoudig uit te voeren beschouwd voor verschillende bodemmaterialen en -kenmerken. Terwijl CCC-systemen in de jaren 70 disruptief waren, kan het tegenwoordig gemakkelijk als mainstream worden beschouwd en zijn functionele volwassenheid op Technology Readiness Level (TRL) 9, waar het daadwerkelijke systeem is "bewezen" door succesvolle systeemadoptie.

Kan hetzelfde worden gezegd van asfalt en verdichting ondersteuningssystemen? Ondanks de belofte dat IC-machinisten kunnen helpen de verdichtingskwaliteit in real-time te regelen, hadden verdichtingssystemen die in het begin van de jaren 2000 werden ontwikkeld, aanvankelijk moeite om de vereiste nauwkeurigheid te bereiken en tot op de dag van vandaag een geschikte acceptatie van de technologie. Terwijl bodemverdichting volwassen is geworden in termen van acceptatie van kwaliteitscontrole en kwaliteitsborging, is asfaltverdichting achtergebleven met onzekerheid over de ontwikkeling van indicatoren voor verdichting (dichtheid) door machinefabrikanten. Indicatoren zoals de Compaction Measurement Value (CMV), Compaction Control Value (CCV), Machine Drive Power (MDP) en andere verwijzen naar indexwaarden die correleren met de stijfheid van de verdichte asfaltlaag. Er is algemene erkenning dat adoptie wordt belemmerd door verschillende definities, een gebrek aan standaardisatie en technische problemen zoals het in real-time meten van dichtheid en laagdikte en het kunnen toewijzen van indicatoren aan individuele lagen. Er is ook de perceptie dat IC-technologie nog steeds als disruptief van aard wordt beschouwd, ondanks dat het al meer dan 20 jaar bestaat. Wanneer gemeten op de bovengenoemde TRL-schaal, wordt algemeen aangenomen dat de functionele volwassenheid van IC-systemen op TRL 8 ligt, aangezien de systemen "voltooid en gekwalificeerd zijn door middel van tests en demonstraties (in de operationele omgeving)" en gedurende een lange tijd, niet in staat geweest om de belangrijke stap te zetten om wereldwijd de industriestandaard te worden.

Dit roept verschillende vragen op, waaronder: Waarom is het gebruik van deze technologieën geen standaardpraktijk van asfaltverwerking? Zijn de ontwikkelde systemen geschikt voor het beoogde doel? Wat zijn de belemmeringen voor brede implementatie en adoptie? Wie neemt de verantwoordelijkheid voor het veranderen van de status-quo? Hoe kan het veranderd worden? Deze vragen zijn niet eenvoudig te beantwoorden. Dit korte overzicht van de wereldwijde adoptie en implementatie van ondersteuningssystemen voor verwerking en verdichting, ondanks dat het beperkt is in de dekking van de onderzochte landen, biedt enkele aanwijzingen voor de te volgen weg.

Laten we eerst de kwestie van geschiktheid voor het doel aanpakken. Uit onderzoek in Nederland sinds 2007 blijkt dat impliciete leer- en operationele praktijken op basis van vakmanschap hebben geleid tot aanzienlijke variabiliteit in de algehele kwaliteit van aangelegde asfaltlagen. Bevindingen met betrekking tot variabiliteit komen overeen met onderzoek dat de afgelopen twee decennia elders is verricht. Toch zijn de benaderingen om de variabiliteit te verminderen verschillend. In Nederland hebben aannemers die behoren tot het ASPARi-netwerk de verantwoordelijkheid genomen om de variabiliteit in hun primaire bouwprocessen te verminderen om verschillende redenen, waaronder het kunnen omgaan met nieuwe contractvormen en de bijbehorende vereisten. Dit laatste heeft geleid tot het veelvuldig gebruik van digitale technologieën bij de grotere aannemers om de asfaltploegen te ondersteunen bij hun taken. Deze bottom-up benadering heeft geleid tot een toename van kennis over primaire bouwprocessen en het gebruik van digitale technologieën. Interessant is dat de geleerde lessen zijn vertaald in nieuwe leerplannen en innovatieve lesmateriaal voor alle onderwijsniveaus, inclusief beroeps-, technisch en universitair onderwijs. Enkele wegbeheerders hebben op hun beurt de introductie van deze technologieën ondersteund, gezien de wens om de levensduur van hun wegnetwerk te verlengen. Daarentegen hebben landen als de VS, Duitsland en Oostenrijk een andere 'top-down'-benadering gevolgd. Er zijn of worden voorschriften geïntroduceerd die specifiek eisen beschrijven met betrekking tot de te gebruiken Intelligente bouwapparatuur, voorschriften van geolocatieapparatuur, constructievereisten, gegevensregistratie, analyse en andere. Ook betalingswijzen en boetes bij niet-naleving maken deel uit van het bestek. In de VS hebben meer dan twintig wegbeheerders (staten) van het Department of Transport (DoT) dergelijke voorschriften geïmplementeerd. Hoewel de genoemde benaderingen duidelijk verschillend zijn (d.w.z. bottom-up versus top-down), hebben beide benaderingen gemeen dat het gebruik van de ondersteunende technologieën kan leiden tot een vermindering van de variabiliteit en als zodanig een belangrijk onderdeel kan zijn van aannemers "Kwaliteitscontrole" initiatieven. Het is daarom duidelijk dat de technologie zelf niet de barrière vormt met de huidige nauwkeurighedsniveaus van de apparatuur die als voldoende worden beschouwd voor kwaliteitscontroledoelstellingen. Het is begrijpelijk dat de vraag of de technologieën een integraal onderdeel kunnen vormen van kwaliteitsborging discutabel is, gezien de complexiteit van het gedrag van asfaltmengsels, het enorme aantal verschillende soorten asfalt en mengsels en de noodzaak van onderzoek om stabielere indices te ontwikkelen met betrekking tot de dichtheid van het mengsel en laagdikte.

Dus, als het probleem niet de technologische gereedheid is, wat is het dan wel? Voor ontwikkelingslanden waarvan het wegnet niet goed ontwikkeld of goed onderhouden is, kunnen de prioriteiten elders liggen gezien de noodzaak om wat ze hebben in een aanvaardbare staat te houden. Het resultaat is dat de huidige hoge kosten van digitale technologieën dergelijke landen kunnen uitsluiten van investeringen in de uitrusting, aanvullende training en systeemkosten, en uiteindelijk een zeer lage prioriteit krijgen op hun wegnetbouwagenda's. Hoge kosten kunnen ook een probleem zijn voor kleinere spelers in ontwikkelde economieën, maar hoogstwaarschijnlijk niet voor grotere wegbeheerders en aannemers. In een aanbestedingsomgeving met de laagste prijs is het waarschijnlijker dat aannemers, gezien de keuze om al dan niet te investeren in ondersteunende systemen, ervoor zullen kiezen om de reeds onder druk staande winstmarges niet te geven.

Misschien ligt het antwoord in de manier waarop de implementatie heeft plaatsgevonden. In het geval van de VS en anderen die de regelgevende route hebben gevolgd, dwingt de top-downbenadering aannemers om te investeren in en de technologieën te gebruiken, zodat ze het risico lopen geen werk te krijgen of niet volledig vergoed te worden voor het uitgevoerde werk. Aan de andere kant hebben wijzigingen in contractvoorwaarden in Nederland er onbedoeld toe geleid dat opdrachtnemers meer moeten weten over hun primaire processen. Digitale kennis, vaardigheden en competenties zijn verworven in een "boetevrije" omgeving. Hoewel dit heeft geresulteerd in aanzienlijk leren, digitaliseringsexpertise, veranderende rollen voor asfaltploegen en nieuwe benaderingen van lesgeven en leren voor de asfaltsector, heeft het niet geleid tot wijdverbreide acceptatie en implementatie bij de meeste aannemers en kleinere wegbeheerders.

Trage implementatie roept twee problemen op, namelijk, wie is de sleutel tot het versnellen van de adoptie en implementatie van ondersteuningssystemen en hoe moet dit gebeuren? Een nadere beschouwing van zowel top-down als bottom-up benaderingen, toont een overeenkomst. Wegbeheerders en publieke opdrachtgevers spelen een belangrijke rol bij het stimuleren van de adoptie en implementatie van dergelijke nieuwe technologieën. Dit is in lijn met eerder onderzoek (REF's) waaruit blijkt dat publieke klanten een cruciale rol spelen bij de adoptie, implementatie en acceptatie van nieuwe (disruptieve) technologieën. Erkenning in Nederland komt de laatste tijd met inspanningen in het programma Asphalt Impuls gericht op het vergroten van de duurzaamheid van aangelegde asfaltlagen. Sleutel tot het al dan niet slagen van dit programma is de betrokkenheid van wegbeheerders bij het stimuleren van innovatie in de asfaltsector. Hoewel een gebrek aan capaciteit, vaardigheden en kennis, in combinatie met een algemene risicoaversiecultuur, voorwaartse beweging kan belemmeren, kan een niets-doen-scenario zelfs een grotere bedreiging vormen voor het benutten van enkele van de waargenomen voordelen van digitale ondersteuningssystemen voor verwerking en verdichting. Het is algemeen bekend dat een overvloed aan gegevens kan leiden tot een beter begrip van de asfaltlevenscyclus, gebruikte materialen en procesoptimalisatie, en het gebruik van geavanceerde gegevensanalyse kan verbeteringen in kwaliteit, prestaties en duurzaamheid mogelijk maken.

Samenvattend begrijpen we dat de huidige ondersteuningssystemen voor verwerking en verdichting geschikt zijn voor hun doel en kunnen worden gebruikt om de voordelen te benutten die verband houden met procesverbetering en kwaliteitscontrole. We begrijpen ook dat opdrachtgevers op vele manieren, direct of indirect, het gebruik van ondersteunende systemen hebben gestimuleerd en zichzelf (en aannemers) in een positie hebben gebracht om de voordelen te benutten die gegevens kunnen opleveren in termen van verbetering van de wegkwaliteit en wegbeheer. Dat opdrachtgevers een leidende rol moeten spelen in het standaard (dagelijkse) gebruik van verhardingen en verdichtings- en ondersteuningssystemen staat buiten kijf. De vraag is hoe we dat het beste kunt doen? Mogen wij u uitnodigen om dit met ons te bespreken en te debateren?

7. Referenties

- [1] D. Makarov, "Developing a real-time process control system for asphalt paving and compaction," 2017.
- [2] H. L. t. Huerne, "Compaction of Asphalt Road Pavements," Enschede, 2004.
- [3] J. L. Briaud and J. Seo, "Intelligent Compaction: Overview and Research Needs," Texas, 2003.
- [4] D. Makarov, S. Miller, F. Vahdatikhaki and A. Dorée, "Comprehensive real-time pavement operation support system using machine-to-machine communication," *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. 13, no. 1, pp. 93-107, 2019.
- [5] S. Yoon, M. Hastak and J. Lee, "Suitability of Intelligent Compaction for Asphalt Pavement Quality Control and Quality Assurance," *Construction Engineering and Management*, vol. 144, no. 4, p. 04018006, 2018.
- [6] H. Cai, T. Kuczek, P. S. Dunston and S. Li, "Correlating Intelligent Compaction Data to In Situ Soil Compaction Quality Measurements," *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 143, no. 8, p. 04017038, 2017.
- [7] X. Zhu, S. Bai, G. Xue, J. Yang, Y. Cai, W. Hu, X. Jia and B. Huang, "Assessment of compaction quality of multi-layer pavement structure based on intelligent compaction technology," *Construction and Building Materials*, vol. 161, pp. 316-329, 2018.

- [8] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, *Intelligent Soil Compaction Systems*, Washington, DC: The National Academies Press, 2010.
- [9] A. Gomes Correia, J. Tinoco, P. Cortez and L. Lamas, *Information Technology in Geo-Engineering*, Switzerland: Springer International Publishing, 2020.
- [10] W. Hu, X. Jia, X. Zhu, H. Gong, G. Xue and B. Huang, “Investigating key factors of intelligent compaction for asphalt paving: A comparative case study,” *Construction and Building Materials*, vol. 229, p. 116876, 2019.
- [11] K. Kaufmann, Interviewee, *Embrace Technology or Be Left Behind*. [Interview].
- [12] Routes De France, “Espace Public & Mobilité-L’ÉTAT DE LA ROUTE 2021,” 2021.
- [13] europapress, “España, a la cola de Europa en gasto en conservación de carreteras,” 08 April 2021. [Online]. Available: <https://www.europapress.es/economia/transportes-00343/noticia-espana-cola-europa-gasto-conservacion-carreteras-20210408123400.html>. [Accessed 28 May 2021].
- [14] ANAS, “THE ROAD EXPERIMENTAL CENTRE,” [Online]. Available: <https://www.stradeanas.it/it/il-centro-sperimentale-stradale-di-cesano>. [Accessed 02 August 2021].
- [15] M. G. Winter, “Continuous compaction control in the UK: history, current state and future prognosis,” *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, vol. 173, no. 4, pp. 348-358, 8 July 2020.
- [16] Region Solid Greece, “Regional Development Program-Region Central Greece,” 2020.
- [17] A. J. L. Ferreira, “Portuguese Road Infrastructures: The Necessary Developments in the Next Years,” Portugal, 2010.
- [18] R. Dekkers and A. Koudstaal, “De meerwaarde van intelligente walssystemen,” 2016.
- [19] The Transtec Group, “What is Intelligent Compaction?,” 18 March 2021. [Online]. Available: <https://www.intelligentconstruction.com/what-is-intelligent-compaction/>. [Accessed 2 July 2021].
- [20] Federal Highway Administration, “Intelligent Compaction Technology for Soils Applications,” 2014.
- [21] Federal Highway Administration, “Intelligent Compaction Technology for Asphalt Applications,” 2014.
- [22] Government of Newfoundland and Labrador, “Specifications Book,” 2011.
- [23] Construlista, “Construcción Mexicana Sigue Estancada,” 26 November 2020. [Online]. Available: <https://www.construlista.com/construccion-mexicana-sigue-estancada/>. [Accessed 2 June 2021].
- [24] brasilengenharia, “A força da compactação inteligente,” [Online]. Available: <http://www.brasilengenharia.com/portal/noticias/destaque/1564-bomag-a-forca-da-compactacao-inteligente>. [Accessed 9 June 2021].
- [25] Ministerio de Obras Públicas, “Guía de buenas prácticas para el control de calidad de mezclas asfálticas y aplicaciones bituminosas,” 2019.
- [26] B. Román, *Compactación Inteligente en Pavimentos Asfálticos: Oportunidades y Retos de Implementación*, 2015.
- [27] R. Esquivel, “Compactación inteligente de suelos, bases y sub-bases en Colombia,” Colombia, 2011.
- [28] SDSN Bolivia, “Industria, innovation e infraestructura,” [Online]. Available: <https://www.sdsnbolivia.org/industria-inovacion-e-infraestructura/>. [Accessed 15 June 2021].

- [29] M. E. Corrales, “Infraestructura pública y servicios asociados”.
- [30] F. Herrera, R. Espinace and J. Palma, “Innovative technologies for the Control of Soil Compaction: Review of the State of the art and experiences in Chile,” 2015.
- [31] La Nación, “Cepal: Paraguay destina mayor inversión en construcción de rutas,” 29 December 2020. [Online]. Available: https://www.lanacion.com.py/negocios_edicion_impresa/2020/12/29/cepal-paraguay-destina-mayor-inversion-en-construccion-de-rutas/. [Accessed 30 June 2021].
- [32] Confirmado.net, “Hito de la RC: Ecuador tuvo el mejor sistema de infraestructura de carreteras en América Latina,” 14 August 2020. [Online]. Available: <https://confirmado.net/2020/09/14/hito-de-la-rc-ecuador-tuvo-el-mejor-sistema-de-infraestructura-de-carreteras-en-america-latina/>. [Accessed 5 July 2021].
- [33] J. Rezaei, “Best-worst multi-criteria decision-making method,” *Omega*, vol. 53, pp. 49-57, 2015.
- [34] D. W. Y. C. J. & Z. Y. Liu, “Intelligent compaction practice and development: a bibliometric analysis,” *Engineering, Construction and Architectural Management*, vol. 27, pp. 1213-1232, 2020.