

Fahrbahnbemessung: derzeitiger Zustand und Entwicklung

Dimensionnement des chaussées: état actuel et évolution

Fahrbahnen unterliegen den Auswirkungen von Belastungen und müssen an die Entwicklungen der Anzahl und der Ausführungen von Fahrzeugen angepasst werden. Um dem Klimawandel und den jüngsten Entwicklungen bei den Fahrbahnmaterialien Rechnung zu tragen, müssen wir die derzeitige Bemessungsmethode einer kritischen Prüfung unterziehen. Es wird vorgeschlagen, die Methodik des VSS beim Fahrbahnbau- und -unterhalt an diese neuen Parameter anzupassen, um den optimalen Kompromiss zwischen Qualität, Kosten und Instandhaltung sicherzustellen.

Zur Bemessung der Fahrbahnen wird in der Schweiz eine empirische Methode angewendet, die auf der Vor-Ort-Beobachtung der Strassen und auf den Ergebnissen

von Versuchen in natürlicher Grösse basiert. Die empirische Referenzmethode, welche die Grundlage für die schweizerische Methode bildet, ist die vom US-Verband American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) in Illinois im Jahr 1961 vorgeschlagene Methode, die den ersten kompletten Bemessungsleitfaden darstellt.

Das Bemessungsverfahren des AASHTO wurde in vereinfachter Form in die Normung des VSS aufgenommen. Es besteht aus zwei Hauptphasen (Abbildung 1): Die Struktur muss zunächst in Abhängigkeit vom Verkehr und der Tragfähigkeit des Bodens bemessen werden. Dann wird eine Überprüfung durchgeführt, um die Beständigkeit des Bodens gegen Gefrieren und Auftauen festzustellen.

Dank ihrer einfachen Konzeption ist diese Methode für eine grosse Anzahl von Benutzern zugänglich. Es wurde festgestellt, dass die Ergebnisse für bestimmte Strukturarten zu einer Überbemessung im Vergleich zu den Resultaten der neuesten Mehr-Lagen-Methoden führen können. Zudem entspricht die aktuelle Bemessungsmethode, die in der Normierung des VSS vorgeschlagen wird, nicht den aktuellen Anforderungen:



PAR
A-G. DUMONT
Professeur,
Laboratoire des voies
de circulation (LAVOC)
EPFL, Lausanne



PAR
SARA BRESSI
Etudiante,
doctorante Laboratoire des
voies de circulation (LAVOC)
EPFL, Lausanne

Les chaussées sont soumises aux effets des charges et doivent s'adapter aux évolutions du nombre et des types de véhicules. Pour tenir compte du changement climatique constaté et des récents développements au niveau des matériaux de chaussées, nous devons reconsidérer la méthode actuelle de dimensionnement. Il est proposé d'adapter la méthodologie VSS à ces nouveaux paramètres pour construire, reconstruire ou renforcer les chaussées et garantir ainsi le compromis optimal entre qualité, coût et entretien.

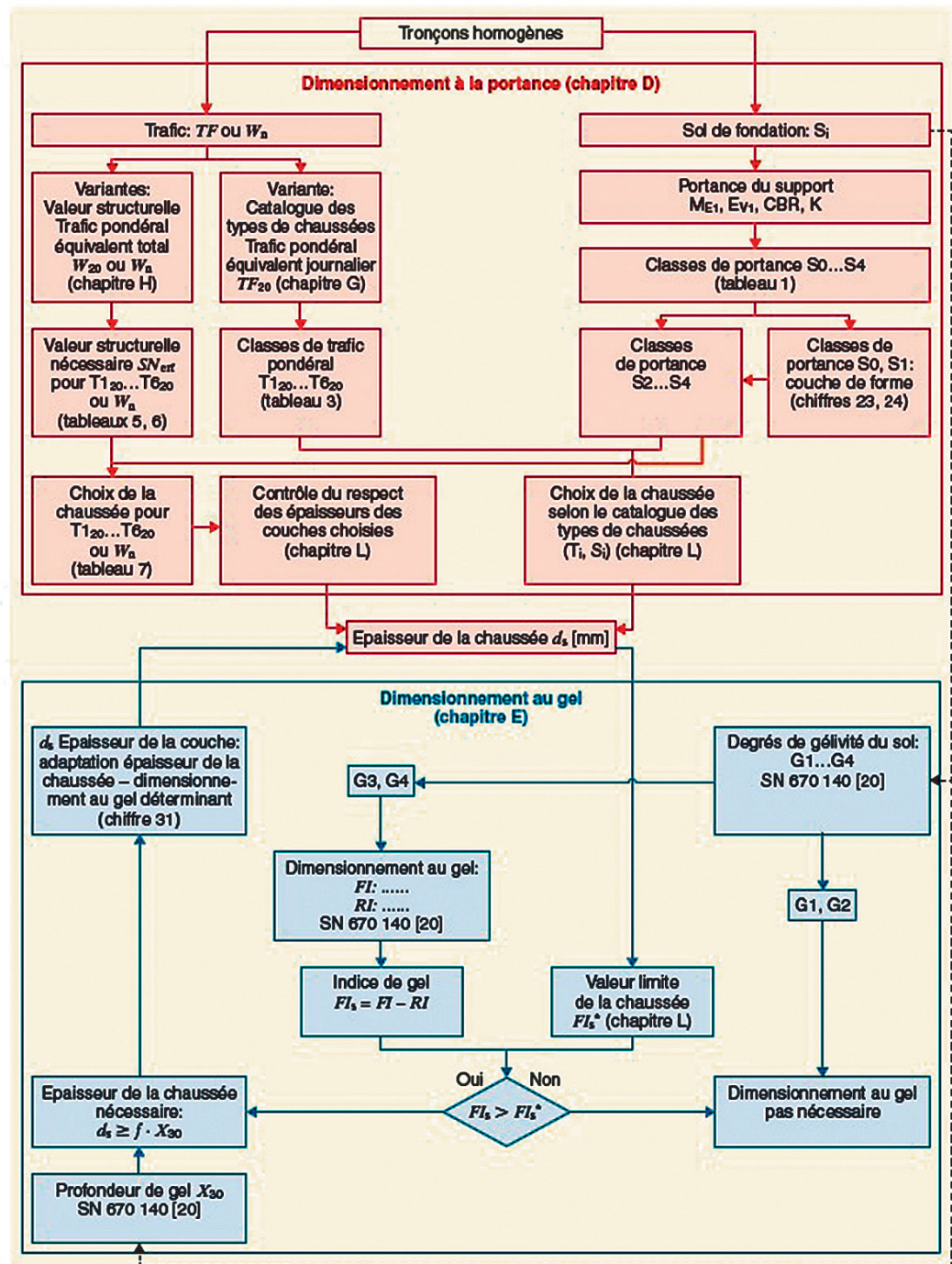
La méthode de dimensionnement de chaussées utilisée en Suisse est une méthode empirique fondée sur l'observation in situ des routes et sur les résultats d'essais en vraie

grandeur. La méthode empirique de référence sur laquelle la méthode suisse se base est celle proposée par l'American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) dans l'Illinois, en 1961, et qui constitue le premier guide complet de dimensionnement.

Le processus de dimensionnement AASHTO a été repris de manière simplifiée dans la normalisation VSS. Il consiste en deux étapes principales (Illustration 1): la structure doit tout d'abord être dimensionnée en fonction du trafic et de la capacité portante du sol, puis une vérification est menée afin de vérifier sa capacité à résister aux effets du gel/dégel.

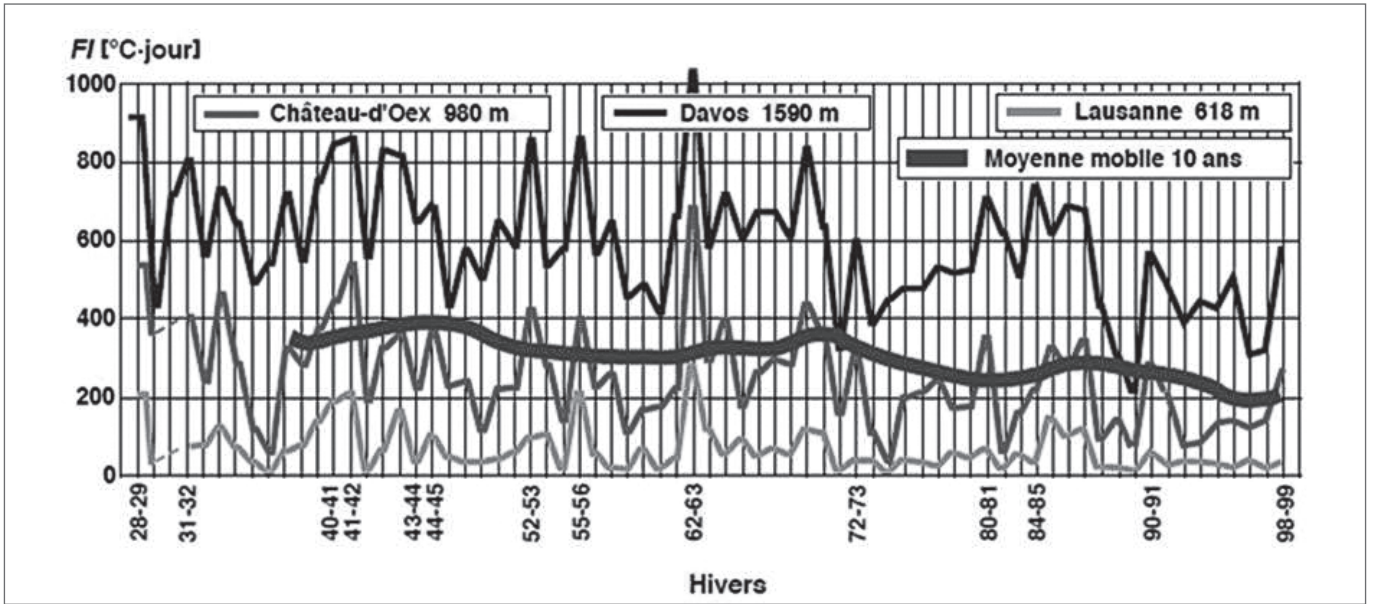
La simplicité de la méthode la rend accessible à un grand nombre d'utilisateurs. Il a été constaté que les résultats peuvent aboutir à un surdimensionnement pour certains types de structure, comparativement aux résultats issus de méthodes multicouches récentes.

La méthode actuelle de dimensionnement, proposée dans la normalisation VSS, n'est finalement plus optimisée pour le contexte actuel:



1 | Diagramme de fonctionnement de la méthode suisse SN 640 324.
1 | Darstellung der Funktionsweise der schweizerischen Methode SN 640 324.

- Der erste Aspekt betrifft den totalen Empirismus der Methode und somit ihre unweigerliche Abhängigkeit von der Erfahrung und den lokalen Bedingungen. Das Kriterium und die Tests, auf denen die Methode basiert, und die Extrapolierung ihrer Gesetze sind jedoch schon über 60 Jahre alt.
- Im Laufe der letzten Jahrzehnte hat die Strassentechnik zahlreiche Änderungen herbeigeführt, nicht nur in Bezug auf die verwendeten Materialien (recycelte Materialien, warme oder kalte Strassenbeläge, geänderte Bindemittel, schallabsorbierende Strassenbeläge), sondern auch in Bezug auf die Konfiguration der Lasten, ihre Anzahl und ihre Intensität. Das Konzept des Achsenäquivalents ist erforderlich. Jedoch führt die Verwendung von sehr grossen Verkehrsklassen zu einem spürbaren Verlust der
- Le premier aspect concerne l'empirisme total de la méthode et donc son indissoluble dépendance de l'expérience et des conditions locales. Le critère et les tests sur lesquels la méthode est basée et l'extrapolation de ses lois datent tout de même de plus de 60 ans.
- Au cours des dernière décennies, la technique routière a apporté de nombreux changements, pas seulement en terme de matériaux utilisés (matériaux recyclés, enrobés tièdes ou froids, liants modifiés, enrobés phono-absorbant), mais aussi en terme de configuration des charges, de leur nombre et de leur intensité. La notion d'essieu équivalent est nécessaire, mais le recours à des classes de trafic très larges a pour conséquence une perte sensible de précision du dimensionnement et aboutit donc à



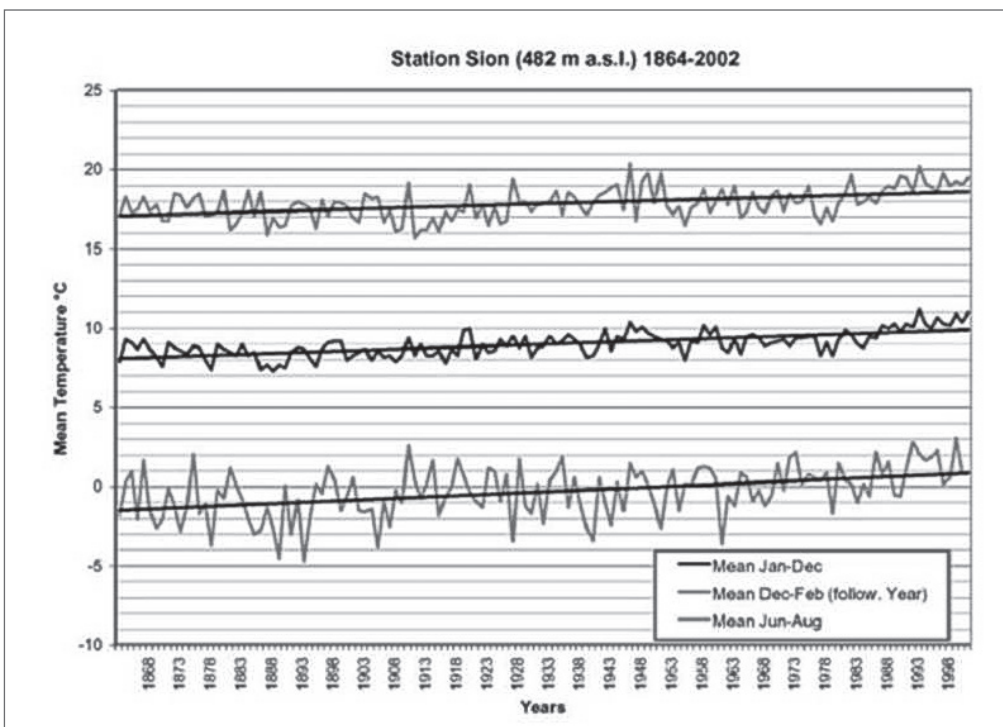
2 | Indices de gel de l'air FI, de 1929 à 1999, pour Davos, Château-d'Oex et Lausanne. (Disly 2000).
2 | Frostindex der Luft FI von 1929 bis 1999 für Davos, Château-d'Oex und Lausanne (Disly 2000).

Bemessungsgenauigkeit und damit zu teilweise überdimensionierten Materialdicken. Die neue Methode ist nur wenig anfällig für Parameter-Veränderungen. Die Erzielung von teilweise überdimensionierten Strukturen ist ausserdem kaum mit der optimalen Nutzung von Naturressourcen und wirtschaftlichen Erwägungen vereinbar.

- Eine weitere Begrenzung der schweizerischen Methode betrifft die Berücksichtigung des Klimawandels. In jüngerer Zeit durchgeführte Studien [Disly, Rychen] haben gezeigt, dass das mechanische Verhalten des Bodens und die Frosttiefe mittel- und langfristig stark vom Klimawandel beeinflusst werden. So hat sich der Frostindex der Luft (FI) seit mehreren Jahrzehnten regelmässig

des épaisseurs de matériaux parfois surévaluées. La méthode actuelle n'est que peu sensible aux variations des paramètres; l'obtention de structures parfois surdimensionnées est par ailleurs peu en accord avec l'utilisation optimale des ressources naturelles et des considérations économiques.

- Une autre limitation de la méthode suisse concerne la prise en compte du changement climatique. Des études récentes [Disly, Rychen] ont démontré que le comportement mécanique du sol et la profondeur de gel sont profondément affectés à moyen et long terme par le changement climatique. Ainsi l'indice de gel de l'air (FI) a diminué régulièrement depuis plusieurs décennies



3 | Evolution des températures de l'air à Sion (VS) de 1864 à 2002 (Böhm et al. 2001).
3 | Entwicklung der Temperaturen der Luft in Sitten (VS) von 1864 bis 2002 (Böhm et al. 2001).

verringert (Abbildung 2), während sich die durchschnittlichen jahreszeitlichen Temperaturen erhöht haben (Abbildung 3), was sich auf die Leistungen ausgewirkt hat.

- Aufgrund der Ungewissheit und der Inhomogenität bei der Bestimmung des Verkehrsvolumens, der Umweltbedingungen und der Materialeigenschaften kann der Prozess der Beschädigung einer Strasse nicht genau festgestellt werden. Folglich wäre es nützlich, die Vorhersage der Leistung auf Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen zu basieren, um eine höhere Genauigkeit und Zuverlässigkeit sicherzustellen. Der derzeitige Ansatz ist fundamental deterministisch und trägt nicht der Variabilität der Ausgangsparameter Rechnung. Dieser Ansatz liefert somit keine Indikatoren für die Zuverlässigkeit der erzielten Ergebnisse. Eine optimale Planung der Instandhaltung und der Verstärkung der Fahrbahnen sollte letztendlich die Geschwindigkeit der Verschlechterung als Variable berücksichtigen. Zur Beurteilung dieser Ungewissheit kann ein Wahrscheinlichkeitskonzept empfohlen werden [Butt et al. 1994].

Das vom Labor LAVOC ins Leben gerufene Projekt REDIRE (Revision der Fahrbahn-Bemessungs- und -Verstärkungsmethoden) zielt darauf ab, eine neue Methodik zur Bemessung und Verstärkung der Verkehrsinfrastruktur zu erstellen, welche die oben beschriebenen Aspekte berücksichtigt.

Internationaler Rahmen

Die derzeitige Tendenz geht in Richtung Entwicklung von Methoden zur Untersuchung des Beanspruchungszustands der Fahrbahn (Spannungen, Verformungen). Bei der Berechnung auf mechanischer Basis wird die Fahrbahn als elastische, homogene und isotrope Mehrlagen-Struktur betrachtet. Diese Hypothesen von Boussinesq und Burmister sind unter Berücksichtigung des Belastungsspektrums und der Position der Berechnungspunkte im Fundament akzeptabel. Andererseits werden Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen sukzessive integriert, und zwar unter Berücksichtigung der Variabilität und der Ungewissheiten der Parameter und der Situation. Eine oft angewendete Bemessungsmethode ist die französische Methode [LCPC-SETRA], die im Programm Alizé® und in jüngerer Zeit im Programm Viscoroute® angewendet wird. Viscoroute® ist nur für nachgiebige Fahrbahnen bestimmt, für die das viskoelastische Verhalten berücksichtigt werden kann. Dieses Werkzeug wird für die Forschung in erster Linie herangezogen, aber normalerweise wird ihm Alizé® bei der Bemessung bevorzugt. Das Berechnungsverfahren ist mechanisch-empirisch. Ihm liegt als Prinzip die Berechnung der Spannungen und Verformungen zugrunde, deren Wert die zulässigen Werte im Oberbau nicht übersteigen darf.

Verschiedene Koeffizienten gestatten die Berücksichtigung von Einflüssen wie Temperatur, Verhalten vor Ort, Berechnungsrisiko oder heterogene Beschaffenheit des Bodens. Andere Parameter, wie die Wechselwirkung an den Schnittstellen (Schichtenhaftung), werden in vereinfachter Weise behandelt. Es ist zu beachten, dass diese Methode nicht die inkrementale Berechnung der Verschlechterung beinhaltet. Es werden zwei Bruchmechanismen berücksichtigt:

(illustration 2) et les températures moyennes saisonnières ont augmenté (illustration 3), causant un impact sur les performances.

- En raison de l'incertitude et de l'inhomogénéité dans la détermination du volume de trafic, des conditions environnementales et des propriétés des matériaux, le processus de détérioration d'une chaussée ne peut être déterminé avec précision. Par conséquent il serait bénéfique de baser la prédiction de la performance sur des considérations probabilistes afin d'assurer une plus grande exactitude et fiabilité. L'approche actuelle est fondamentalement déterministe et elle ne prend pas en compte la variabilité des paramètres initiaux. Elle ne fournit donc pas d'indications sur la fiabilité des résultats obtenus. Une planification optimale de l'entretien et du renforcement des chaussées devrait finalement considérer la vitesse de détérioration comme une variable; une approche probabiliste peut être recommandée pour évaluer cette incertitude [Butt et al. 1994].

Le projet REDIRE: «Révision des méthodes de dimensionnement et renforcement des chaussées», initié par le LAVOC, vise à établir une nouvelle méthodologie pour le dimensionnement et le renforcement des infrastructures de transport, qui tienne compte des aspects décrits précédemment.

Cadre international

La tendance actuelle est au développement de méthodes analysant l'état de sollicitation au sein de la chaussée (contrainte, déformation). Le calcul mécanistique considère la chaussée comme un multicouche élastique, homogène et isotrope. Ces hypothèses, apportées par Boussinesq et Burmister, sont acceptables en fonction de la gamme de charges et de la position des points de calcul au sein du massif. D'autre part des notions probabilistes sont peu à peu intégrées, prenant en compte la variabilité et les incertitudes des paramètres et de la situation. Une des méthodes de dimensionnement fréquemment utilisée est la méthode française [LCPC-SETRA] qui trouve son application dans le logiciel Alizé® et, plus récemment, Viscoroute®. Relevons que Viscoroute® est destiné aux chaussées souples uniquement, pour lesquelles le comportement viscoélastique peut être considéré. Cet outil sera privilégié pour la recherche mais on lui préférera généralement Alizé® dans le cadre d'un dimensionnement. Le processus de calcul est mécanique-empirique avec pour principe de base le calcul des contraintes et déformations dont la valeur ne doit pas excéder des valeurs admissibles au sein de la superstructure.

Divers coefficients permettent de prendre en compte des effets comme la température, le comportement in situ, le risque de calcul ou l'hétérogénéité du sol. D'autres paramètres, comme l'interaction aux interfaces (collage des couches), sont traités de manière simplifiée. Notons que cette méthode ne comporte pas de calcul incrémental de détérioration. Deux mécanismes de rupture sont considérés:

- la fatigue qui apparaît au bas des couches liées, causée par le passage répété des charges;

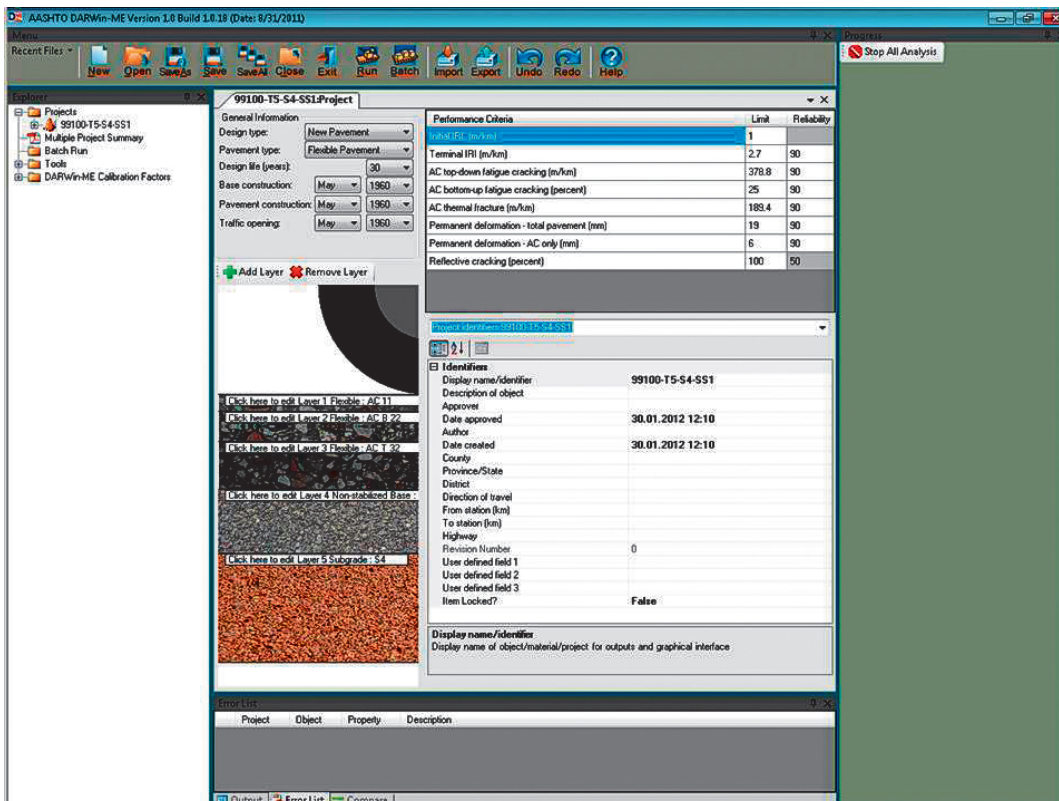
- die Ermüdung, die im unteren Bereich der verbundenen Lagen auftritt und durch die wiederholte Belastung verursacht wird;
- die Spurrillenbildung, die durch vertikale Kompression und durch Nachverdichtung der Lagen hervorgerufen wird. Die Spurrillenbildung wird durch die Berechnung der vertikalen Verformung am höchsten Punkt des Unterbodens verifiziert.

In Europa muss auch die deutsche Bemessungsmethode (PaDesto) erwähnt werden, die einen ähnlichen Ansatz wie die französische Methode vorsieht. Nach der Wahl der Oberbauausführung in Abhängigkeit von den Witterungsbedingungen, den Verkehrsverhältnissen und den Materialparametern wird ein Berechnungsmodell angewendet. Die Beanspruchungen werden bestimmt und es wird eine Verifizierung in Bezug auf die Referenzwerte durchgeführt. Die deutsche Methode ist ein mechanischer, empirischer Prozess, der die Bedingungen in der Schicht genauer betrachtet als ein rein empirischer Prozess. Falls die Methode bezüglich der Ermüdungsbemessung vertieft wird, erfolgt die Behandlung der Spurrillenbildung in empirischer Weise [RDO-Asphalt]. Die Situation ist auch in Nordamerika anders. Die Software Pavement M-E resultiert aus der Weiterentwicklung der AssHTO-Methode und ist eine der erschöpfendsten und effizientesten Bemessungsmethoden. Bei diesem Bemessungsverfahren wird zunächst die Fahrbahnreaktion (Spannung, Verformung und Deflexion durch lineare elastische Analyse) berechnet. Dann werden diese Ergebnisse benutzt, um in inkrementaler Weise die Entwicklung des Schadens im Laufe der Zeit zu beurteilen. Das Modell berechnet also die zunehmende Beschädigung im Laufe der Einsatzdauer der Fahrbahn. Es vergleicht die zulässigen und berechneten Werte für die folgenden Beschädigungen: Abschleiß, Längsrissbildung,

- l'orniérage qui est dû à l'effet de la compression verticale et au post-compactage des couches. L'orniérage est vérifié par calcul de la déformation verticale au sommet du sol du support.

En Europe, il faut également mentionner la méthode allemande de dimensionnement (PaDesto) qui propose une approche comparable à celle de la méthode française. Après le choix du type de superstructure en fonction des conditions météorologiques, des conditions de trafic et des paramètres des matériaux, un modèle de calcul est appliqué. Les sollicitations sont déterminées et la vérification faite par rapport à des valeurs de référence. La méthode allemande est un processus mécanique empirique qui considère de manière plus précise les conditions dans la couche qu'un procédé purement empirique. Relevons que si la méthode est approfondie concernant le dimensionnement à la fatigue, le phénomène d'orniérage n'est quant à lui traité que de façon empirique [RDO-Asphalt]. La situation est encore différente en Amérique du Nord. Le logiciel Pavement M-E, résulte de l'évolution de la méthode ASSHTO et constitue l'une des plus exhaustive et efficace méthode de dimensionnement.

La procédure de dimensionnement calcule tout d'abord la réponse de la chaussée (contrainte, déformation et déflexion par analyse linéaire élastique), puis utilise ces résultats pour évaluer de manière incrémentale l'évolution du dommage au fil du temps. Le modèle calcule donc l'accumulation de dommage au cours de la durée de service de la chaussée. Il compare les valeurs admissibles et calculées pour les dommages suivants: le faïençage, la fissuration longitudinale, la fissuration transversale, l'ornière totale, l'ornière de l'enrobé, l'IRI (International Roughness Index) [NCHRP].



4 | Ecran initial du logiciel Pavement M-E.
4 | Startseite des Programms Pavement M-E.

Querrissbildung, Gesamtspurrille, Belagsspurrille und IRI (Internationaler Rauigkeitsindex) [NCHRP].

Diese Methode bietet viele Vorteile [Velasquez R. et al.]:

- hohe Genauigkeit bei der Berechnung des Spannungs-Verformungszustandes,
- Berechnung eines Zuverlässigkeitsindex,
- Möglichkeit der Eingabe einer grossen Menge von Input-Daten,
- genaue Festlegung der Fahrbahn-Materialien,
- Berücksichtigung der Temperaturen,
- zahlreiche beurteilte Leistungen,
- Benutzung eines inkrementalen Prozesses.

Es können aber noch einige Punkte verbessert werden, wie etwa die Wechselwirkungen an der Schnittstelle zwischen den Schichten und die Behandlung der Variabilität der Input-Parameter.

Mögliche Entwicklung in diesem Bereich

Heutzutage gibt es viele leistungsfähige Methoden und Werkzeuge zur Bemessung von Fahrbahnen. Es bleibt aber noch ein Verbesserungspotenzial zu wünschen übrig. Zusätzlich zu den Auswirkungen von Klima und Verkehr müssen bei den Bemessungsmethoden die Entwicklungen von neuen Materialien und Technologien für den Strassenbau berücksichtigt werden. Wir beschreiben im Folgenden einige Aspekte durch die Vorstellung einiger Forschungsbereiche des LAVOC.

Materialien

Die Bemessungsmethoden müssen die Entwicklung der Merkmale und Leistungsfähigkeiten der Baustoffe berücksichtigen. Die warmen Strassenbeläge, deren Herstellungs- und Verlegungstemperaturen geringer sind als bei den herkömmlichen heissen Strassenbelägen, gestatten beträchtliche Energieeinsparungen und die Verringerung der Schadstoffemissionen. Die vom LAVOC zurzeit durchgeführten Forschungsarbeiten [Bueche 2011] innerhalb der Schweiz (Projekt PLANET) betreffen insbesondere die Beurteilung der mechanischen Leistungsfähigkeiten und deren Entwicklung im Laufe der Zeit (Abbildung 5). Parallel dazu wurde ein Modell

Les avantages de cette méthode sont nombreux [Velasquez R. et al.]:

- précision élevée dans le calcul de l'état de contrainte-déformation,
- calcul d'un indice de fiabilité,
- possibilité d'introduire un grand volume de données d'entrée, avec définition détaillée des matériaux de chaussée,
- prise en compte des températures,
- nombreuses performances évaluées,
- utilisation d'un processus incrémental.

Mais il y a aussi quelques points qui pourraient être améliorés comme: l'interactions à l'interface entre les couches et le traitement de la variabilité des paramètres d'entrée.

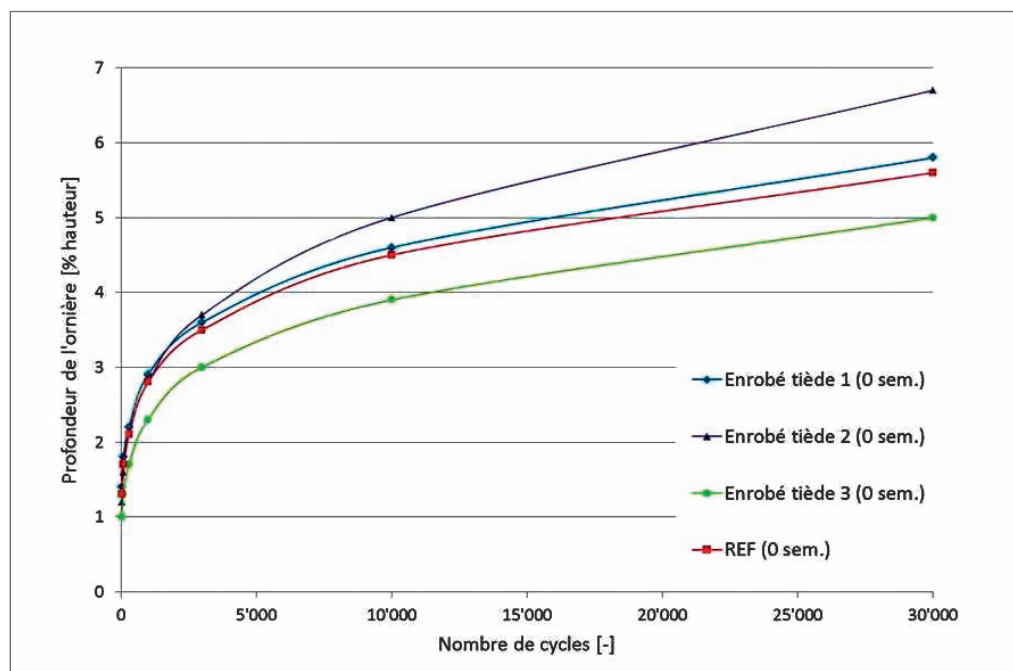
Evolution possible dans ce domaine

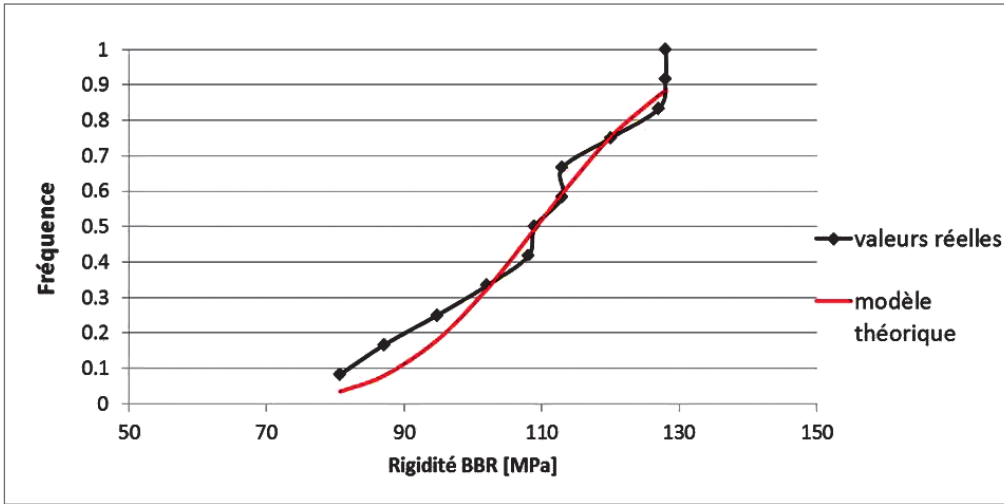
Aujourd'hui, de nombreuses méthodes et outils performants pour le dimensionnement des chaussées existent et un potentiel d'amélioration reste souhaitable. En plus de la prise en compte des effets du climat et du trafic, les développements de nouveaux matériaux et technologies pour la construction routière doivent être considérés dans les méthodes de dimensionnement. Nous illustrons ci-après quelques aspects par la présentation de certains domaines de recherche du LAVOC.

Matériaux

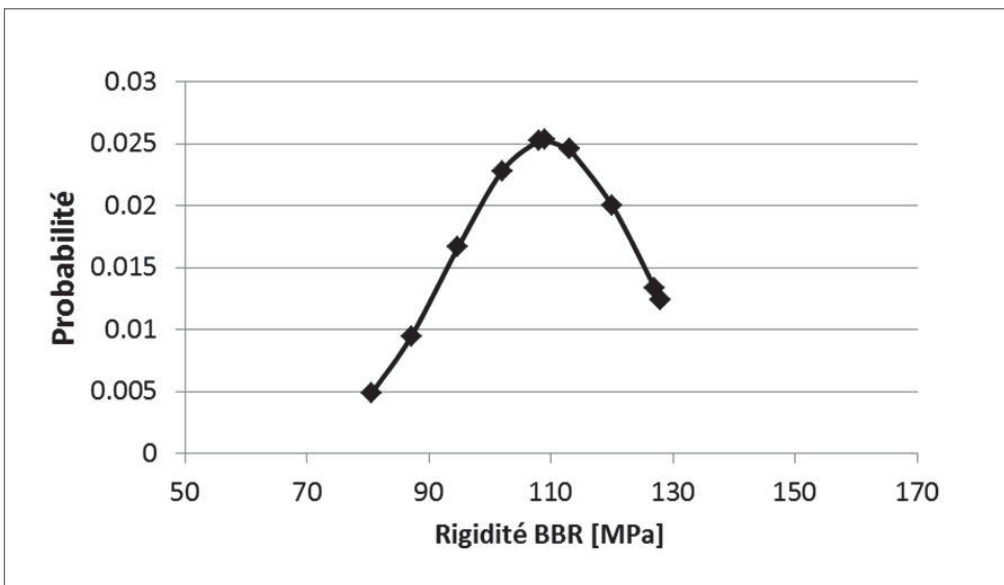
Les méthodes de dimensionnement se doivent de prendre en compte l'évolution des caractéristiques et des performances des matériaux de construction. Les enrobés tièdes dont les températures de production et de pose sont réduites par rapport aux enrobés à chaud traditionnels permettent d'économiser de manière substantielle l'énergie ainsi que de diminuer les émissions. Les recherches menées au LAVOC [Bueche 2011] et en cours au niveau Suisse (projet PLANET) s'intéressent notamment à l'évaluation des performances mécaniques et leur évolution dans le temps (Illustration 5). Parallèlement, un modèle multicritère a été déve-

5 | Résistance à d'ornièrage pour un enrobé à chaud (REF) et trois enrobés tièdes [Bueche 2011].
5 | Beständigkeit einer heiss aufgetragenen Strassendecke (REF) und von drei warm aufgetragenen Strassendecken gegen Spurrillenbildung [Bueche 2011].





6a | Exemples de fonction de probabilité cumulative.
6a | Beispiele einer kumulativen Wahrscheinlichkeitsfunktion.



6b | Fonction de masse de probabilité pour un liant à -10°C [Bressi et al.].
6b | Wahrscheinlichkeitsmassenfunktion für ein Bindemittel bei -10 °C [Bressi et al.].

mit mehreren Kriterien entwickelt, das dem Entscheidungsträger gestattet, die optimale Art des Strassenbelags (warm) auszuwählen. Dabei erfolgt die Wahl in Abhängigkeit von mehreren Parametern, zu denen die mechanischen Leistungsfähigkeiten, die Lebensdauererwartung, die Herstellungskompliziertheit, die Recycling-Fähigkeit, das Risiko usw. gehören.

Es ist auch eine Studie im Gange, die sich mit der Benutzung von Recycling-Strassenbelägen (RAP) und deren Berücksichtigung bei Bemessungsmethoden befasst. Gegenstand dieser Studie sind insbesondere die folgenden Aspekte:

- Entwicklung einer neuen Mischungstabelle (Blending Chart), die es gestattet, die Starrheit der Mischung auf der Basis des zugeführten Bitumens und des in den RAP enthaltenen Bitumens zu erzielen, und zwar für unterschiedliche Temperaturen und RAP-Anteile.
- Da keine grossen Labor-Versuche erforderlich sind, ist es möglich, das Recycling-Material in der Bemessungsmethodik zu berücksichtigen.

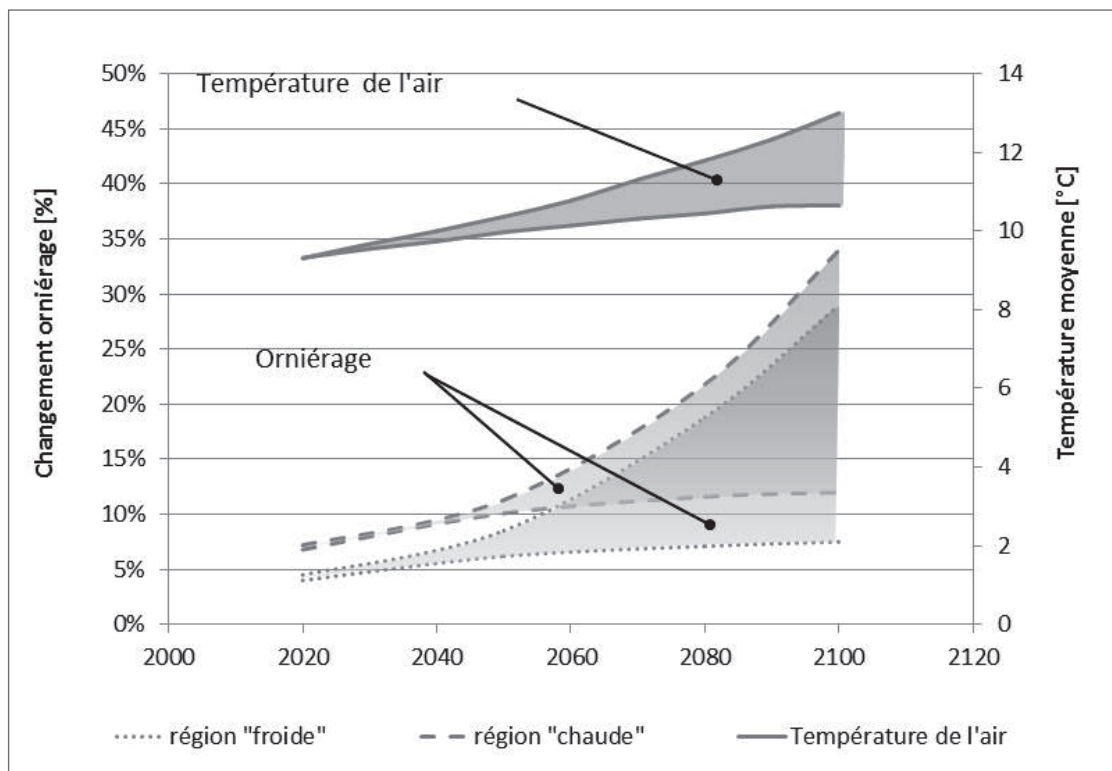
Zudem läuft eine Studie bezüglich der Variabilität der Materialien, um genauere Informationen über die Streuung der Merkmale und deren Auswirkungen auf die Bemessung zu erhalten (Abb. 6).

loppé, permettant au décideur de sélectionner le type d'enrobé (tiède) optimal, ceci en fonction de multiples paramètres dont les performances mécaniques, l'inventaire du cycle de vie, la complexité de fabrication, le potentiel de recyclabilité, le risque, etc. Une étude est également en cours avec pour thème l'utilisation d'enrobé recyclé (RAP) et leur prise en compte dans les méthodes de dimensionnement. Cette étude traite notamment les aspects suivants:

- Le développement d'une nouvelle table de mélange (blending chart) qui permettra d'obtenir la rigidité du mélange à partir du type de bitume d'apport et de celui contenu dans le RAP, ceci pour différentes températures et teneurs en RAP.
- Sans nécessiter des essais de laboratoire lourds, il sera donc possible de considérer le matériau de recyclage dans la méthodologie de dimensionnement.

Une étude sur la variabilité des matériaux est également en cours, ceci dans le but d'obtenir des considérations plus précises sur la dispersion des caractéristiques (ex. module) et leur incidence sur le dimensionnement (Illustration 6).

7 | Augmentation de la profondeur d'ornière en fonction de la température moyenne [Rychen 2013].
 7 | Zunahme der Spurrillentiefe in Abhängigkeit von der durchschnittlichen Temperatur [Rychen 2013].



Klima

Die vom LAVOC durchgeführte Erforschung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Konzeption der Infrastruktur hat insbesondere gezeigt, dass die Entwicklung des Klimas für die Beurteilung der Leistungsfähigkeiten der Fahrbahnen in der Schweiz berücksichtigt werden muss [Rychen]. Es kann auch auf die folgenden Ergebnisse verwiesen werden:

- Die Analyse mit der schweizerischen Bemessungsmethode hat gezeigt, dass eine rückläufige Entwicklung der Frostindexe der Luft (FI) und somit eine Verringerung der Frosteindringtiefe zu erwarten ist.
- Es ist eine grössere Spurrillentiefe aufgrund der Zunahme des Verkehrs und der Steigerung der Temperaturen in der Region zu erwarten (Abbildung 7).
- Die anderen Leistungsfähigkeitsmerkmale, wie beispielsweise die Ermüdungsrisssbildung oder die thermisch bedingte Rissbildung, sind ebenfalls vom Klimawandel abhängig, jedoch in weniger stark ausgeprägter Weise.

Es ist deshalb wichtig, dass die bereits festgestellten Entwicklungen und die Modelle zur Prognostizierung des Klimawandels in die Bemessungs- und Verstärkungsmethoden einbezogen werden und ihre Auswirkungen auf die Entwicklung der Verschlechterung der Fahrbahnen untersucht werden.

Wahrscheinlichkeitsmodelle

Es besteht ein beträchtliches Potenzial für die Entwicklung von Bemessungs- und Verstärkungsmethoden durch die Einführung von Wahrscheinlichkeitsmodellen auf der Grundlage

Climat

La recherche concernant l'impact du changement climatique sur la conception de l'infrastructure menée au LAVOC a notamment montré que l'évolution du climat doit être considérée pour l'évaluation des performances des chaussées en Suisse [Rychen]. Les résultats suivants peuvent également être mis en évidence:

- L'analyse avec la méthode suisse de dimensionnement a montré qu'une baisse continue des indices de gel de l'air (FI) doit être attendue et donc une diminution des profondeurs de pénétration du gel.
- Une augmentation des profondeurs d'ornières, fonction de l'augmentation du trafic et des températures de la région est attendue (Illustration 7).
- Les autres performances telles que la fissuration par fatigue ou la fissuration thermique dépendent également du phénomène de changement climatique, mais ceci de manière moins marquée.

Il est donc important d'inclure les évolutions déjà constatées et les modèles de prévision du changement climatique dans les méthodes de dimensionnement et renforcement, et examiner leurs effets sur l'évolution de la détérioration des chaussées.

Modèles probabilistes

Un important potentiel de développement des méthodes de dimensionnement et renforcement existe par l'introduction de modèles probabilistes basés sur la variabilité des matériaux, ce qui sous-entend une différence dans les propriétés intrin-

der Variabilität der Materialien. Dies setzt einen Unterschied in den inhärenten Eigenschaften zwischen verschiedenen Punkten des bei den derzeitigen Methoden als homogen erachteten Unterbaus voraus. Heutzutage scheint die Arbeit mit deterministischen Prognosen der Werte nicht geeignet zu sein, und zwar aufgrund der Infinität der Faktoren, die sich auf die Ungewissheit der Ergebnisse auswirken [Hyung et al.]. Die Implementierung der mathematischen Modelle, welche die Berechnung der Eigenschaften der Materialien gestatten und einen teilweisen Verzicht auf Versuchswiederholungen im Labor ermöglichen, sowie die Realisierung von Modellen mit genauerer Leistung sind wichtige Forschungserfordernisse in diesem Bereich. Wir weisen nochmals darauf hin, wie gross die Herausforderung ist, die darin besteht, eine Methodik für die analytische Bemessung und Verstärkung zu entwickeln, um ein Werkzeug zu erhalten, das in der Lage ist, sich an die verschiedenen Entwicklungen anzupassen.

Fazit und Ausblick

Die zurzeit in der Schweiz angewendete Methode zur Bemessung und Verstärkung der Infrastruktur ist ausschliesslich empirisch und basiert auf den AASHO-Versuchen, die zwischen 1958 und 1960 in Illinois (USA) durchgeführt wurden. Die Grenzen dieser Methode sind offensichtlich. Auf internationaler Ebene sind die jüngsten Entwicklungen auf diesem Gebiet zahlreich. Dies zeigt, dass es notwendig ist, optimierte Bemessungsmethoden zu erzielen. Vom LAVOC wurde eine Studie der Faktoren durchgeführt, die sich auf die Konzeption der Infrastruktur auswirken. Dabei wurden die verschiedenen Materialien, die im Bauwesen eingesetzt werden, und die Klimaveränderungen und deren Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit von Fahrbahnen untersucht. Diese Studien gestatten eine detaillierte Bestimmung der Parameter, die für die Bemessung verwendet werden, und steigern gleichzeitig die Genauigkeit des Ergebnisses. Es handelt sich dabei um einen Beitrag zur Erzielung von genaueren Ergebnissen, ohne die Struktur unterzudimensionieren. Eine solche Unterbemessung hätte vorzeitige Schäden zur Folge. Es erfolgt dabei aber auch keine Überdimensionierung, um einen unnötigen Einsatz von Material und finanziellen Ressourcen zu vermeiden.

sèques d'un point à un autre du massif supposé homogène dans les méthodes actuelles. De nos jours, le travail avec des prédictions des valeurs en terme déterministe ne semble plus adapté, ceci en raison de l'infinité de facteurs affectant l'incertitude des résultats [Hyung et al.].

L'implémentation des modèles mathématiques qui permettent de calculer les propriétés des matériaux et de s'affranchir partiellement d'une répétition d'essais en laboratoire, ainsi que la réalisation de modèles de performance plus précis, sont des besoins de recherche importants dans ce domaine. Nous nous attachons à relever le défi qui consistera à développer une méthodologie de dimensionnement et renforcement analytique, aboutissant à un outil capable de s'adapter aux différentes évolutions.

Conclusions et perspectives

La méthode de dimensionnement et renforcement des infrastructures appliquée actuellement en Suisse est entièrement empirique et basée sur les essais AASHO menés entre 1958 et 1960 en Illinois (USA). Les limites de cette méthode sont évidentes. Dans le cadre international les développements récents dans ce domaine sont nombreux, reflétant le fait qu'il est nécessaire de parvenir à des méthodes de dimensionnement optimisées. Une étude des facteurs influant sur la conception de l'infrastructure a été menée par le LAVOC, avec l'analyse de différents matériaux utilisés dans la construction ainsi que l'étude des changements climatiques et de ses effets sur la performance des chaussées.

Ces études permettent une détermination détaillée des paramètres utilisés pour le dimensionnement, tout en augmentant la précision du résultat. Il s'agit d'une contribution visant à obtenir des résultats plus précis, ceci sans sous-dimensionner la structure ce qui aurait pour conséquence des dommages prématurés, mais également sans sur-dimensionner afin d'éviter une utilisation inutile de matière et de ressources financières.

Bibliographie

- Dysli M. (2007). Etude expérimentale du dégel d'un limon argileux. Application aux chaussées et pergélisols alpins. Thèse EPFL n.3792.
- Rychen P. (2013). Impact du changement climatique sur les infrastructures routières: analyse de risque et mesures d'adaptation. Thèse EPFL n.5611.
- Butt A., Shahin M.Y., Carpenter S.H., Carnahan J.V. (1994). Application of Markov Process to Pavement Management Systems at Network Level. 3rd International Conference on Managing Pavements.
- LCPC-SETRA (1994). Conception et dimensionnement des structures des chaussées.
- Société de recherche sur les routes et la circulation routière (2009). Directives relatives au calcul du dimensionnement de la superstructure de zones de circulation comportant une couche de revêtement en asphalte. RDO-Asphalt 09.
- Yang H. Huang (1993). Pavement Analysis and Design. Prentice Hall Englewood Cliffs, New Jersey.
- Velasquez R. et al. (2009). Implementation of MEPDG for new and rehabilitated pavement structures for design of concrete and asphalt pavement in pavement in Minnesota. Minnesota Department Transportation.
- Bueche N. (2011). Évaluation des performances et des impacts des enrobés bitumineux tièdes. Thèse EPFL n.5169.
- Rychen P. (2013). Les infrastructures routières suisses vont-elles résister au changement climatique? Route et trafic n. 11 Novembre 2013.
- Hyung Bae Kim, Neeraj Buch (2003). Reliability-based pavement design model accounting for inherent variability of design parameters. 82nd Transportation Research Board Annual Meeting Washington D.C.
- NCHRP (2004). Guide for Mechanistic-Empirical Design – MEPDG. NCHRP Report 1-37A.