

Berekeningen in CIMpel

1. Inleiding

Het programma CIMpel berekent de benodigde dikte van een gebonden fundering op basis van ontwerpcriteria van deze fundering. Overige verhardingslagen worden **niet** getoets, daarvoor wordt verwezen naar andere dimensioneringsprogramma's, zoals Keuzemodel Wegconstructies (KMW), Ascon en Vencon. Uitgangspunt voor CIMpel zijn bestaande, bekende en beproefde technieken, zonder daarbij nieuwe (materiaal)modellen te ontwikkelen.

Er is voor gekozen de dikte van de fundering te bepalen aan de hand van de ontwerpcriteria, waarbij de gebruiker de dikte van de toplaag (asfalt, beton of elementen) moet opgeven. Het is ook mogelijk de benodigde dikte van de toplaag te bepalen bij een vaste dikte van de fundering. Daarvoor wordt verwezen naar de bovengenoemde andere dimensioneringsprogramma's, in CIMpel moet dit handmatig gebeuren.

2. Ontwerpcriteria gebonden funderingen

De ontwerpcriteria van een gebonden fundering zijn afhankelijk van het type binding. In CIMpel worden de funderingsmaterialen derhalve in twee groepen ingedeeld:

Flexibel gebonden funderingen (bv. bitumen gebonden materialen)

Hierbij wordt de dikte van de fundering gedimensioneerd op:

- Vermoeiing onder in de fundering;
- Breuk onder in de fundering.

Bros gebonden funderingen (bv. cement gebonden materialen)

Hierbij wordt eveneens gedimensioneerd op:

- Vermoeiing onder in de fundering;
- Breuk onder in de fundering.

Daarnaast vindt bij brosse materialen een toets plaats op basis van:

- Verbrijzeling boven in de fundering. Aangezien de dikte van de fundering nauwelijks invloed heeft op dit criterium is dit in CIMpel geen dimensioneringscriterium, maar een toetsingscriterium. Indien dit criterium niet voldoet zal de gebruiker de dikte van de toplaag moeten wijzigen;
- Doorslaan van scheuren in de fundering in een asfalt toplaag (reflectiescheuren): ook hier geldt dat dit criterium alleen afhankelijk is van de opgegeven dikte van de asfalttoplaag en dus geen ontwerpcriterium maar een toetscriterium.

2.1. Vermoeiing

Vermoeiing wordt gebaseerd op de rek onder in de fundering. Van de funderingsmaterialen moet dus een rekgestuurde vermoeiingsrelatie bekend zijn, waarbij twee type relaties mogelijk zijn:

- Enkel-log relatie: $\text{Log}(N_{\text{toel}}) = C1 * \text{Eps} + C2$;
- Dubbel-log relatie: $\text{Log}(N_{\text{toel}}) = C1 * \text{Log}(\text{Eps}) + C2$.

Bij vermoeiing is het totale spectrum van de asgewichten van vrachtwagens van belang. In geval van een dubbel-log relatie kan zo'n spectrum eenvoudig worden omgerekend in een eiuivalentie factor ten opzichte van een standaard belasting. Bij de dimensionering van asfaltverhardingen, waarbij de vermoeiing ook dubbel-logarithmisch wordt uitgedrukt, wordt gewerkt met een 100kN standaard as en wordt het spectrum omgerekend in een vrachtwagenschadefactor. Probleem is dat dit voor een enkel-logs relatie niet mogelijk is. In KMW is dit opgelost door een dubbel-log relatie te fitten van de enkel-log relatie, hetgeen natuurlijk een (veel) slechtere fit oplevert. In CIMpel is besloten dit niet te doen en steeds met het hele spectrum te werken, conform de aan-

pak bij Vencon. Teneinde het aantal berekeningen te beperken wordt de berekende rek bij de standaardaslast van 100kN lineair elastisch omgerekend naar een rek bij een andere aslast(klasse). Deze rek wordt vervolgens in de vermoeiingsrelatie gebruikt zodat de N_{oel} van die aslast(klasse) kan worden bepaald. Samen met het percentage optreden van deze aslast(klasse) kan de Miner-bijdrage van de aslast(klasse) worden bepaald en vervolgens gesommeerd voor alle aslastklassen.

De lineair elastische omrekening van de rek per aslast(klasse) houdt in dat feitelijk met een vaste straal van de (band)belasting wordt gerekend, dus ONafhankelijk van die aslast. Een verdere verfijning door het hanteren van een bandspectrum, zoals in Vencon 2.0, is niet ingebouwd. De invloed hiervan op de rek onder in de fundering is overigens ook zeer beperkt. Ook bij de dimensionering van asfaltverhardingen wordt, door het toepassen van een equivalentiefactor/ vrachtwagenschadefactor, dit aspect verwaarloosd.

2.2. Breuk

Tevens wordt gedimensioneerd op basis van breuk ten gevolge van een incidentele (hoge) aslast. In geval van een brosse fundering wordt gecontroleerd op een toelaatbare breukspanning en/of breukrek en in geval van een flexibel materiaal alleen op een toelaatbare breukrek. Ook hier wordt de spanning of rek bij de hoge aslast lineair elastisch berekend uit de spanning of rek bij de standaard aslast.

2.3. Verbrijzeling

Alleen in geval van een bros funderingsmateriaal wordt getoets op het criterium verbrijzeling in de bovenkant van de fundering, conform Keuzemodel Wegconstructies.

Als maat voor het ontwerpcriterium van verbrijzeling aan de bovenzijde van de fundering wordt de maximale verticale spanning aan de bovenzijde van de wegfundering gehanteerd. Deze spanning wordt vervolgens getoetst aan de toelaatbare druksterkte van het materiaal. De volgende vergelijking beschrijft het model ter bepaling van de levensduur behorend bij de verbrijzelingsconditie die zich manifesteert als 10 mm vervorming aan de bovenzijde van de fundering. De ontwerpbelasting is dezelfde die ook voor vermoeiing onder in het asfalt wordt gehanteerd.

$$\log(N_{CA}) = (8,894 - 0,55 z) \cdot \left(1 - \frac{s_{v2}}{(1,31 - 0,085 z) \cdot s_d} \right)$$

waarbij N_{CA}	=	toelaatbaar aantal lastherhalingen tot voortgezette verbrijzeling
s_{v2}	=	maximale verticale spanning boven op fundering (kPa)
s_d	=	druksterkte van materiaal (kPa)
z	=	z-score van standaardnormale verdeling (-)

In tegenstelling tot bij de vermoeiingslijn van asfalt is in bovenstaande vergelijking het effect van versprend rijden verdisconteerd. De dimensionering op verbrijzeling van boven in de gebonden fundering is vooral van belang bij constructies waarop een dunne asfaltlaag zal worden toegepast. Bij zeer intensief belaste verhardingen zou met de vergelijking slechts een zeer kleine verhouding tussen uitgeoefende spanning en druksterkte van het funderingsmateriaal toelaatbaar zijn. Dit leidt dat tot onwaarschijnlijke asfaltdikten. Het model is echter afgeleid en ontworpen voor wegen met een relatief dun asfaltpakket. Daarom is in de software de via dit criterium berekende asfaltdikte begrensd op 120 mm.

2.4. Reflectiescheurvorming

Alleen in geval van een asfalt toplaag op een broos gebonden fundering wordt getoets op de kans op reflectiescheurvorming. De minimum asfaltdekking kan bij wegen op een brosse fundering als volgt worden bepaald. Uiteraard moet het rekenresultaat op praktische waarden worden afgerond.:

Bij zwaar belaste hoofdwegen:

$$H_{\text{asf},\text{min}} = 13.229 \text{ Ln} (E_{\text{fundering}}) + 96,760$$

En bij minder zwaar belaste wegen:

$$H_{\text{asf},\text{min}} = 3,1433 \text{ Ln} (E_{\text{fundering}}) + 29,169$$

waarbij $h_{1,\text{min}}$ = minimum asfaltdekking (mm)
 $E_{\text{fundering}}$ = stijfheidsmodulus 'stijve' fundering (MPa)

Genoemde relaties zijn aan het type weg gekoppeld. Let wel dat de vergelijkingen gebaseerd zijn op ervaringen met traditionele materialen. Recente ervaringen tonen al aan dat er materialen op de markt komen die een hoge stijfheidsmodulus weten te combineren met een redelijke tot goede weerstand tegen scheuren. Voor die materialen zou een geringere asfaltdekking toegepast mogen worden.

3. Berekeningen

Net als bij KMW worden per berekening geen specifieke modelberekeningen uitgevoerd. Er wordt gebruik gemaakt van een database met de resultaten van dergelijke berekeningen, die met een bepaalde set vaste invoergegevens zijn verkregen.

Teneinde het aantal (handmatige) berekeningen te beperken is in KMW gebruik gemaakt van een beperkte set invoergegevens, waardoor interpolatie tussen de resultaten noodzakelijk is. Hierbij is een lastige drievoudige interpolatie noodzakelijk ($E_{\text{ondewrgrond}}$, $H_{\text{fundering}}$ en H_{asfalt}). In CIMpel is de database met berekeningsresultaten automatisch gegenereerd, waarbij gekozen is om alle mogelijk te selecteren combinaties te berekenen, zodat interpolatie niet noodzakelijk is. Hierbij is de volgende set invoergegevens gecombineerd:

Omschrijving	E_{min}	E_{max}	E_{stap}	H_{min}	H_{max}	H_{stap}	$N_{\text{comb.}}$
	MPa	MPa	MPa	mm	mm	mm	
Toplaag							126
Koudasfalt	3750	-	-	80	150	5	15
Conventioneel asfalt	7500	-	-	80	300	5	45
Asfalt met betere vermoeiing	12500	-	-	80	300	5	15
Beton C28/35	31000	-	-	180	300	5	25
Beton C35/45	33500	-	-	180	300	5	25
Straatstenen+straatlaag	1500	-	-	110	-	-	1
Fundering	1000	10000	500	200	750	50	228
Onderfundering	100	-	-	500	1000	250	3
Ondergrond	20, 50, 75, 100, 150			-			5

In de laatste kolom staat het aantal combinaties per laag. Totaal levert dit $126 * 228 * 3 * 5 = 430.920$ combinaties op.

Dit aantal combinaties levert een ander probleem op. Per berekening wordt de spanning aan de bovenzijde van de fundering (verbrijzeling) en de spanning en rek aan de onderzijde van de fundering (vermoeiing/ breuk) tengevolge van een standaard 100 kN aslast opgeslagen, ofwel per



berekening 3 getallen. Voor opslaan in dubbele precisie (15-16 cijfers achter de komma) zijn 8 bytes noodzakelijk zodat de omvang van de database $430.920 * 3 * 8 =$ ca. 10 Mb. Voor uitgifte op CD geen probleem, voor download vanaf internet wat te omvangrijk. Ook de tijd voor het zoeken naar de juiste resultaten per berekeningsstap wordt hierdoor negatief geïnvloed. Gezocht is naar mogelijkheden de omvang van de database te verkleinen. Gezien de globaliteit van de berekeningen is ervoor gekozen de spanningen af te ronden op een heel aantal kPa en de rekken op een heel aantal $\mu\text{m}/\text{m}$. Per berekening zijn nu nog maar $3 * 2$ bytes noodzakelijk, een reductie van 25%. Dit is gecombineerd met bekende technieken (alleen verschillen opslaan en data comprimeren) zodat uiteindelijk een database overblijft van 429 kB (dus ca. 1 byte per berekening!). De nauwkeurigheid van de database is getest en akkoord bevonden.

De berekeningen zijn uitgevoerd met behulp van een lineair elastisch en isotroop meerlagenmodel. Bij een betonverharding is echter de rand van de betonplaat maatgevend, hetgeen niet met een meerlagenmodel is te modelleren. Hiervoor is een correctiefactor bepaald:

- Voor de rand op een gebonden fundering geldt lastoverdrachtpercentage van 35%; er geldt dan $F_{\text{red}} = 0,825 * F$;
- De spanning aan een 'vrije' plaatrand is 2,0 keer die in het plaatmidden i.c. de meerlagensituatie.

Ergo de spanning/rek is dus: 1,65 keer die in het plaatmidden/ML-situatie.

4. Bediening

De het gebruik van het programma is een Windows help gemaakt. In deze help is op overzichtelijke wijze de bediening van het programma uitgelegd.