

Optimalisatie beheersing scheurwijdte in doorgaand gewapende betonverharding

Marc Stet

VIA Aperta Verhardingsadviseurs B.V.

Wim Kramer

Cement&BetonCentrum

Samenvatting

De maximale scheurwijdte in doorgaand gewapend betonverhardingen is beperkt tot 0,4 mm. Het is echter de moeite waard om naar optimalisatie van de scheurwijdte te streven. Als namelijk de wapening iets hoger in de constructie wordt aangebracht, kunnen krimp en verkorting door afkoeling, beter worden opgenomen. Daarnaast kan ook een economisch voordeel worden behaald met de hoeveelheid toe te passen wapening. Maar is het wel verstandig om te besparen op langswapening. Gelet op de praktijk is een afname van de scheurwijdte na te streven.

1. Ontwerp doorgaand gewapende betonverhardingen

1.1. Inleiding

Bij het ontwerp en de aanleg van (doorgaand) gewapende betonverhardingen (dgb) komen vaak discussies uit het verleden weer ter sprake. Discussie hierbij is het ontstaan van een bepaald scheurenpatroon en de voorspelbaarheid hiervan. Onderbouwing van gemaakte keuzes in het verleden ontbreken meestal omdat destijds geen plan gemaakt is om het bewuste aspect in de tijd te volgen. Behalve in het geval dat het helemaal misgaat, wordt er eigenlijk niet meer naar de betonverharding omgekeken. Door gebrek aan verificatie van het gedrag van betonverhardingen kan het voorkomen dat verkeerde keuzes worden gemaakt waardoor reparatie in een latere fase nodig is. Ook kan mogelijk de verwachte levensduur niet worden gehaald. Gelukkig zijn in het laatste decennium een aantal doorgaand gewapende betonverhardingen aangelegd, waarbij het scheurgedrag is vastgelegd. De opgedane kennis is ingezet om te komen tot een gestandaardiseerde dgb-detaillering. Voorbeelden zijn de 'Update RWS betonspecs' van Rijkswaterstaat [1] en de 'Ontwerptechnische zaken en standaarddetails' van de provincie Noord-Brabant [2].

Deze bijdrage gaat in op scheurbeheersing bij doorgaand gewapende betonverhardingen en de validatie van het scheurgedrag. Ook wordt ingegaan op de mogelijkheden om de vaste wapeningspercentages langswapening met Vencon2 [3] verder te optimaliseren door bijvoorbeeld gebruik te maken van het hoger in de doorsnede aanbrenge van de wapening in de doorsnede, ook wel excentriciteit naar boven genoemd. Ook kan het gebruik van wapening met een kleinere kenmiddellijn dan de standaard wapeningsstaven Ø20 mm voordelig uitwerken.

1.2. Principe doorgaand gewapende betonverharding

In een verharding van ongewapend beton zijn dwarsvoegen nodig om de lengteveranderingen als gevolg van vocht- en temperatuurvariaties te kunnen opnemen; zo wordt de onvermijdelijk optredende scheurvorming geprogrammeerd. Bij een doorgaand gewapende betonverharding moet langswapening de functie van de dwarsvoegen overnemen.

Omdat bij betonverhardingen door verdamping alleen vochtverlies aan de bovenzijde plaatsvindt, ontstaan er in de bovenste 6 à 8 cm grote trekspanningen, die scheuren in het verhardende beton tot gevolg kunnen hebben. Beheersing van deze scheurvorming, d.w.z. het bewerkstelligen van fijn verdeelde scheuren met een aanvaardbare scheurwijdte, is onder deze omstandigheden mogelijk door het aanbrenge van wapening. Bij doorgaand betonverhardingen is het gebruikelijk om een nagenoeg centrale wapening toe te passen, die op een afstand van 35 tot 50% van de bovenzijde ligt. De door krimp veroorzaakte verhinderde opgelegde vervorming van beton wordt bij dgb-verhardingen in langsrichting volledig verhinderd. Doordat het staal niet meekrimpt, worden verplaatsingen verhinderd en nemen de spanningen in het verhardende beton toe. Het gevolg is een regelmatig patroon van gecontroleerde fijn verdeelde ragfijne scheurtjes. In de loop der tijd komt daar onder invloed van de verkeersbelasting een klein aantal buigscheurtjes bij. Na ongeveer vier jaar heeft de verharding zijn definitieve scheurstadium bereikt. De scheurafstand blijft dan vrijwel constant. De (dwars)scheuren staan vrijwel loodrecht op de wapening.

In de dwarsrichting wordt een beperkte wapening aangebracht. Deze 'support' heeft hoofdzakelijk tot doel de langswapening op hoogte te houden en te ondersteunen bij aanleg. De dwarswapening heeft dan ook geen scheurverdelende functie; bij aanlegbreedten groter dan vijf meter moeten langsvogen worden aangebracht. Hét voordeel van doorgaand

gewapende betonverhardingen is dat de bij Rijkswegen obligate zoab-deklaag kan worden aangebracht.

1.3. 'Update RWS Betonspecs' en 'Ontwerptechnische zaken en details'

Het ontwerp van een dgb-constructie is voornamelijk gebaseerd op mechanistische-empirische modellen die afgeleid zijn van ervaringen in de praktijk. Rijkswaterstaat gebruikt voor de bepaling van de benodigde dikte voor dgb-verhardingen geen theoretische dimensioneringsmethode, maar richt zich sterk op de Belgische situatie, met enige aanpassingen aan de Nederlandse omstandigheden.

De ontwerpmethodiek is opgenomen in de 'Specificaties Ontwerp Doorgaand Gewapende Betonverhardingen' (Update RWS Betonspecs [1]) en dient als verificatiemethode voor het wegbouwkundig ontwerp van nieuwe doorgaand gewapende betonverhardingen met een geluidreducerende laag. De Specificaties geven de kaders aan waarbinnen Vencon2 [3] voor het laagdikteontwerp moet worden toegepast. De Specificaties kunnen desgewenst ook worden gebruikt voor het onderliggend wegennet.

In kort bestek komt het dgb-ontwerp neer op berekenen van de laagdikte van de betonverharding uitgaande van de aslastspectra, temperatuursinvloed, onderbouw en de betoneigenschappen, waarna een voor de sterkteklasse voorgeschreven hoeveelheid wapening wordt toegepast.

Het betonstaal moet de scheurvorming beheersen qua scheurwijdte. Hierdoor blijft de samenhang en duurzaamheid van de betonverharding behouden. De hoeveelheid wapening is afhankelijk van de sterkteklasse en laagdikte. Bij rijkswegen worden de volgende vaste wapeningspercentages toegepast:

- C25/30, C30/37 en C35/45: 0,70%
- C45/55: 0,75%

Door de provincie Noord-Brabant wordt sterkteklasse C35/45 voorgeschreven met als langswapening 0,70%. De standaard langswapening bestaat uit staven met een kenmiddellijn van 20 mm. Als staalsoort voor de langswapening en koppelstaven is staalkwaliteit B500B gebruikelijk.

De duurzaamheid van de constructie wordt naast de langswapening beïnvloedt door de dekking op de wapening en de ligging van de wapening in de doorsnede. Bij rijkswegen bedraagt de betondekking $80 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$ zodat door de excentrische ligging de wapening beter als krimpwapening fungeert. Bij een 250 mm dikke betonlaag bedraagt de excentriciteit 35 mm. Door de provincie Noord-Brabant wordt een excentrische ligging van 33 mm naar boven toegepast. De met het trekstaafmodel berekende scheurwijdte is aanzienlijk kleiner dan de toegestane 0,40 mm. In tabel 1 is de *thans* gangbare langswapening zoals toegepast door Rijkswaterstaat (2013) en de provincie Noord-Brabant (2011) weergegeven. Bij centrische ligging bedraagt de scheurwijdte 0,40 mm. Uit tabel 1 blijkt bij gelijk gebleven wapening, theoretisch de scheurwijdte afneemt naar 0,17 à 0,22 mm. De kleinere scheurwijdte is voor Rijkswaterstaat en de provincie overigens geen argument om minder wapening toe te passen. De scheurwijdte is immers geen ontwerpcriterium maar een scheurwijdte-toets op duurzaamheid.

Tabel 1. In de praktijk toegepaste hoeveelheid langwapening.

Kenmerken wapening	Rijkswaterstaat		Prov. Noord-Brabant
	C35/45	C35/45	C35/45
Sterkteklasse	C35/45	C35/45	C35/45
Wapeningspercentage	0,70	0,70	0,70
Langwapening	Ø 16-115	Ø 20-180	Ø 20-180
Hoogteligging langwapening, excentrisch	½ H + 37 mm	½ H + 35 mm	½ H + 33 mm
Betondekking (mm)	80	80	82
Berekende scheurwijdte (mm)	0,17	0,21	0,22
Wapeninghoeveelheid (mm ² /m)	1748	1745	1745
Overlappende staven (mm)	450	500	450
Dwarswapening	Ø 12-700	Ø 12-700	Ø 12-600

De mogelijkheden van Vencon verleiden sommige ontwerpers wel om de scheurwijdte als ‘ontwerpcriterium’ te gebruiken en minder wapening dan het vaste wapeningspercentage toe te passen. Daarbij wordt voorbij gegaan aan het gegeven, dat met name de onvermijdelijk optredende temperatuurkrimp daags na het storten de optredende scheurwijdte bepaalt. Vooral bij zomerse omstandigheden valt de optredende scheurwijdte groter uit dan theoretisch verwacht. In dit verband wordt gewezen op de mogelijkheid om met Vencon 2 bij de uitvoering rekening te houden met met name de nachtelijke afkoeling tijdens de verharding van het jonge beton. Met een aanvullende berekening kan de noodzaak om aanvullende maatregelen als het aanbrengen van noppendekens te bepalen. Zo kan worden voorkomen dat de initiële scheurwijdte groter dan 0,40 mm wordt.

1.4 Verdere optimalisatie van het ontwerp

In VENCON2 is de maximaal mogelijke hoogteligging van de wapening in de doorsnede, ook wel excentriciteit naar boven genoemd, gelimiteerd tot 25 mm. Dit sluit goed aan op de gangbare uitvoeringspraktijk. Toch gaan geluiden op om de excentriciteit verder te verhogen. Door de wapening nog hoger aan te brengen wordt deze effectiever als krimpwapening benut en kan de scheurwijdte en/of de hoeveelheid wapening worden teruggebracht. Enerzijds kan minder wapening worden toegepast, waarbij de scheurwijdte gelijk blijft, en anderzijds kan bij een gelijkblijvende hoeveelheid wapening, de scheurwijdte afnemen. De vraag is wat de voorkeur heeft; afname van de scheurwijdte of economisch voordeel. Daarbij wordt de optimalisatie begrensd door de benodigde minimum wapening voor ‘beton onder trek’ en door de strengere ‘scheurwijdte-eisen’ als gevolg van de kleinere dekking. Van belang is dat het trekstaafmodel aansluit op de praktijk. Daarom is aan de hand van een recente ervaringen de geschiktheid van het trekstaafmodel voor het voorspellen van de scheurwijdte nagegaan.

2. Geschiktheid trekstaafmodel voor voorspellen van de scheurwijdte

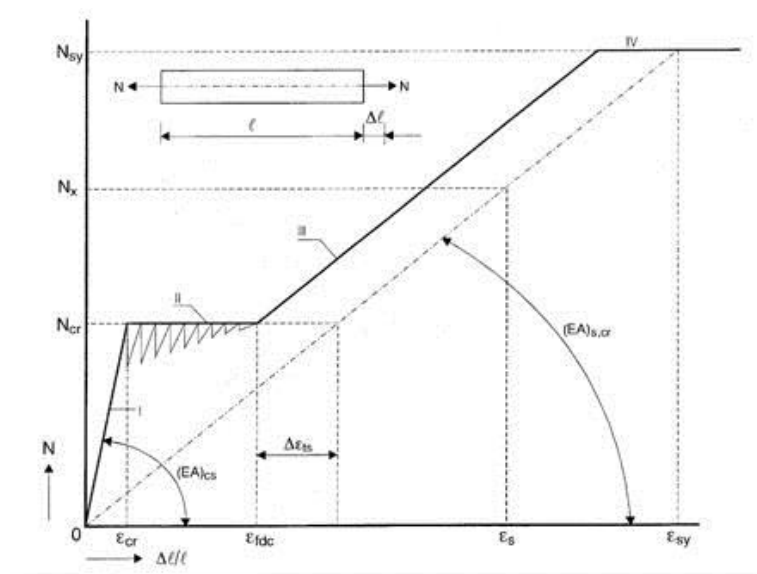
2.1. Bepaling wapeningspercentage op basis van centrische rek

Met het vereenvoudigd model beschreven in de Handleiding Wegenbouw – Ontwerp Verhardingen 1998 [4] is te berekenen dat 0,69% wapening nodig is om de staalspanning bij centrische rek beneden de toelaatbare rekgrens van 0,2% te houden. Bij een bestekdikte voor de betonverharding van 250 mm en een betonsterkteklasse van C35/45 bedraagt de langwapening Ø20-180 (0,70%). Deze wapening is gelijk aan die thans wordt voorschreven in de ‘Specificaties Ontwerp Doorgaand Gewapende Betonverhardingen’

Nadeel van de methode op basis van centrische rek is dat de scheurwijdte niet wordt beschouwd.

2.2. Bepaling wapeningspercentage op basis van verhinderde vervorming

Een meer geavanceerder trekstaafmodel is ontwikkeld door de TU Delft. Dit rekenmodel is beschreven in [5] en vormt het rekenhart voor de berekening van de scheurwijdte in het CROW-programma VENCON 2. Rijkswaterstaat gebruikt VENCON 2 alleen voor de laagdikteberekening en niet voor het toetsen van de scheurwijdte daar uitgegaan wordt van bij een sterkteklasse behorende wapeningspercentages.



Figuur: Doorsnede gewapend betonnen trekstaaf met kracht-vervormingsrelatie

De karakteristieke kracht-vervormingsrelatie van de trekstaaf kan in drie takken worden verdeeld: de ongescheurde tak, de scheurvormingsfase en de fase waarin in het scheurenpatroon voltooid is. Ontworpen wordt op de scheurvormingsfase (gebied II) en wordt ook wel de onvoltooid scheurfase genoemd. In dit gebied ontwikkelt het scheurenpatroon zich. Deze fase wordt gekenmerkt door een constante scheurwijdte en bij toename van de belasting een afname van de (gemiddelde) scheurafstand. Aanvankelijk is sprake van een 'onvoltooid' scheurenpatroon. Dit betekent dat de initiële scheurwijdte beperkt is, en naarmate de opgelegde vervorming toeneemt, zich meer dwarsscheuren ontwikkelen bij gelijkblijvende scheurwijdte. Derhalve daalt de gemiddelde scheurafstand tijdens de gebruikperiode. Zodra de overdrachtzones van de scheuren elkaar gaan overlappen en er geen 'ongestoorde' doorsneden meer zijn, ontstaan er geen nieuwe scheuren. Het onvoltooid scheurenpatroon gaat dan over in het voltooid scheurenpatroon. Pas na ca. vier jaar is het scheurenpatroon volledig ontwikkeld.

Met het trekstaafmodel wordt in gebied II gemiddelde scheurwijdte (w_{mo}) in het onvoltooid scheurenpatroon berekend en de overdrachtslengte (l_{st}). De overgang naar voltooid scheurenpatroon treedt op als alle scheurafstanden liggen tussen l_{st} en $2l_{st}$. In RWS-contracten wordt gestreefd naar zoveel mogelijk scheuren tussen 0,8 en 3,0 m (zogenaamde scheurafstandklasse III). Op de scheurafstand kan nauwelijks worden gestuurd. Wel wordt gestreefd naar een maximum aantal scheuren in klasse III met tussenafstanden van 0,8 tot 3,0m, en met een minimum aantal scheuren tussen de 0,2 en 0,4 m (klasse I, minimale

clustervorming). Scheurvorming in klasse II (0,4 – 0,8 m) en hoger betekent scheurvorming in het onvoltooide scheurpatroon.

Nadat met VENCON op basis van een vermoeiingsberekening de betondikte van de doorgaand gewapende plaat is berekend, wordt de wapeningsgeometrie getoetst op basis van de karakteristieke bovengrens van de scheurwijdte. De te hanteren formules zijn te vinden in het achtergrondrapport dat bij de software van VENCON2 wordt geleverd [6].

2.3. Scheurwijdte toets voor duurzaamheid

De scheurwijdte wordt beoordeeld in de bruikbaarheidsgrenstoestand. Er is een onvoltooid of voltooid scheurenpatroon, volgens de definities van NEN 6720, art. 8.7.2-3. Een scheurwijdte toets kan van belang zijn in verband met de materiaalduurzaamheid en vloeistofdichtheid. Bij betonverhardingen wordt de scheurwijdte toets met de permanent aanwezige opgelegde vervormingen uitgevoerd (zonder verkeersbelasting).

Uitgangspunt voor de scheurwijdte toets is de scheurwijdte welke afhankelijk is van milieuklasse XD3 (dooizouten, chloriden; wisselend nat en droog) en de betondekking. Normaliter geldt voor gewapend beton en een minimum dekking c_{\min} van 30 mm, een scheurwijdte w_{\max} van 0,2 mm. Maar bij toepassing van grote betondekkingen is volgens de VBC een minder strenge eis van toepassing. De toelaatbare scheurwijdte w_{toel} bedraagt 0,2 mm $\times c/c_{\min} \leq 2$ met c als dekking. Bij de thans gebruikelijke dekking van 70 tot 80 mm is $c/c_{\min} = 2$, waardoor de toelaatbare scheurwijdte toeneemt tot 0,40 mm. Overigens geeft de literatuur aan, dat bij doorgaand gewapende betonverhardingen een scheurwijdte tot 0,70 mm allerzins aanvaardbaar is [7, 8]. Hierbij treedt geen corrosie van de wapening op.

2.4. Voorspellende waarde trekstaafmodel

Bij de ontwikkeling van Vencon 2 zijn op de A50 scheurwijdtemetingen uitgevoerd. De geschiktheid van het Delfts trekstaaf model is aan de hand van praktijkwaarnemingen tijdens de aanleg van de A5 en A50 voor ‘dikke dekkingen’ is gevalideerd [9, 10]. De validatie berust op waarnemingen van de optredende karakteristieke bovengrens van de scheurwijdte. Deze wordt bepaald door de gemiddelde korteduur scheurwijdte w_{mo} te verhogen met toeslagen met een factor 1,69 voor spreiding en invloed van langeduur-/wisselbelasting. Bij een scheursterkte gelijk aan 60% van de gemiddelde 28-daagse korteduur betontreksterkte bleken de berekende gemiddelde scheurwijdte (w_{mo}) en karakteristieke bovengrens van de scheurwijdte goed met gemeten waarden overeen te komen.

De geschiktheid van het trekstaafmodel voor het voorspellen van de scheurwijdte kan verder op basis van de gegevens van contract LB-8211 (2007) van RWS Limburg worden bepaald. Dit contract behelst de aanleg van een dgb-verharding voor het gedeelte Tegelen- Venlo Blerick. De verharding is ontworpen op sterkteklasse C45/55. De betondikte varieert afhankelijk van de verkeersbelasting tussen 243 en 262 mm. Het toegepaste wapeningspercentage is ca. 0,75. Het ontwerp is op basis van contractregie uitgevoerd waarbij is uitgegaan van centrische plaatsing. De door de aannemer met VENCON 2 berekende gemiddelde scheurwijdte w_{mo} bedraagt 0,18 tot 0,19 mm. De karakteristieke scheurwijdte op t_{∞} incl. spreidingsfactor en factor voor invloed langeduur- wisselbelasting bedraagt 0,31 mm.

Aan de hand van de gegevens uit de bedrijfscontrole is de karakteristieke scheurwijdte berekend op basis van de as-built gegevens van de hoogteligging van de wapening, het werkelijke wapeningspercentage en de K-waarde van het beton. De resultaten zijn opgenomen

in tabel 2. Door in de uitvoering optredende variaties bedraagt de *berekende* karakteristieke scheurwijdte, gemiddeld 0,37 mm (contracteis 0,40 mm).

Tabel 2. Berekende scheurwijdte w_{mo} met trekstaafmodel o.b.v. as-built gegevens A73 perceel C.

Serie	h ontwerp	langs wapenin g	h werk	W%	X ₁₂	K-waarde	w _{mo}	w _k
1	248	ø20-170	261	0,71	50,8	46,1	0,20	0,36
2	248	ø20-170	262	0,71	52,2	47,3	0,21	0,37
3	263	ø20-160	269	0,73	53,9	47,5	0,19	0,35
4	243	ø20-170	249	0,74	63,4	59,7	0,20	0,38
5	248	ø20-170	262	0,71	58,0	53,1	0,22	0,43
6	250	ø20-170	251	0,74	54,6	46,2	0,18	0,31
7	243	ø20-170	253	0,73	60,7	57,3	0,20	0,39
8	243	ø20-170	257	0,72	60,8	55,4	0,21	0,44
9	243	ø20-170	248	0,75	51,9	43,8	0,18	0,30
10	243	ø20-170	254	0,73	57,2	50,1	0,20	0,37
Gemiddelde			257	0,73	56,4	50,7	0,20	0,37

In het kader van contract LB-8211 zijn in de realisatiefase op vooraf vastgestelde vakken van 100m lengte scheurwijdte- én scheurafstandmetingen uitgevoerd.

Tabel 3. Gemeten scheurwijdte w_{mo} , $w_{mo,95\%}$ en scheurklasse op $t=40$ dagen; as-built gegevens A73 perceel C.

Scheuren		Scheurwijdte (mm)		Scheurklasse (%)			
aantal (-)	gem afstand (m)	w _{mo}	w _{mo,95%}	1	2	3	4
				< 0,4 m	0,4 -0,8 m	0,8-3,0 m	> 3,0 m
1	90,06	0,20	0,20	0,0	0,0	0,0	100,0
7	12,30	0,13	0,16	33,3	0,0	0,0	66,7
17	4,14	0,12	0,14	0,0	0,0	18,8	81,3
90	1,09	0,21	0,23	16,9	16,9	66,3	0,0
90	1,09	0,21	0,23	16,9	16,9	66,3	0,0
66	1,50	0,29	0,31	4,6	13,9	80,0	1,5
66	1,50	0,29	0,31	4,6	13,9	80,0	1,5
75	1,33	0,34	0,36	2,7	20,3	77,0	0,0
75	1,33	0,34	0,36	2,7	20,3	77,0	0,0
23	3,90	0,23	0,25	0,0	0,0	55,6	44,5
28	3,60	0,18	0,20	0,0	3,7	51,9	44,5
27	4,14	0,28	0,30	3,7	7,7	42,3	46,4
48	2,00	0,24	0,25	2,1	8,5	70,2	19,2
19	3,98	0,27	0,31	5,6	0,0	27,8	66,7
25	2,67	0,23	0,25	0,0	8,3	54,2	37,5
36	2,80	0,18	0,20	2,9	5,7	51,4	40,0
10	8,46	0,19	0,23	0,0	0,0	11,1	88,9
20	3,97	0,23	0,26	5,3	5,3	31,6	57,9
43	2,44	0,27	0,28	2,4	2,4	66,7	28,6

Scheuren		Scheurwijdte (mm)		Scheurklasse (%)			
aantal (-)	gem afstand (m)	w_{mo}	$w_{mo,95\%}$	1	2	3	4
				< 0,4 m	0,4 -0,8 m	0,8-3,0 m	> 3,0 m
35	2,84	0,21	0,23	11,8	5,9	32,4	50,0
21	4,78	0,20	0,24	0,0	0,0	90,0	10,1
20	1,16	0,25	0,36	0,0	10,5	52,6	36,8
56	1,77	0,25	0,27	7,3	12,7	67,3	12,7
34	2,78	0,24	0,26	6,1	62,7	7,0	24,2
30	3,37	0,23	0,26	3,6	10,0	46,5	39,9

Uit de metingen blijkt dat de meeste scheuren bij een gemiddelde scheurafstand van 3,37 m in het onvoltooide scheurpatroon liggen (2_{1st}). De in het werk op $t \approx 40$ d gemeten gemiddelde 95% bovengrens van de scheurwijdte bedraagt 0,26 mm. Om deze scheurwijdte te kunnen vergelijken met de met VENCON 2 berekende eindwaarde moet de scheurwijdte $w_{mo,95\%}$ worden verhoogd met een factor voor invloed van langeduur- en wisselbelasting. De kar. bovengrens van de scheurwijdte op t_{∞} bedraagt 0,34 mm. Deze waarde komt goed overeen met de met VENCON 2 berekende waarde van 0,31.

Mede op basis van validatie op basis van gegevens afkomstig van perceel C van de A73, mag gesteld worden dat het trekstaafmodel A73 geschikt is voor het in de uitvoeringspraktijk controleren van de optredende scheurwijdte. Ook kan het worden gebruikt om afwijkingen, die in de realisatiefase kunnen optreden, te beoordelen. Opgemerkt wordt dat iets grotere scheurwijdten kunnen optreden bij een grotere laagdikte (overdikte ten opzichte van de bestekdikte) waardoor de dekking toeneemt en langswapening relatief lager ligt. Ook een grotere betondruksterkte is nadelig voor de scheurwijdte. Paradoxaal is wel de gunstige invloed hiervan op de levensduur van de verharding.

3. *Optimalisatie scheurwijdtebeheersing*

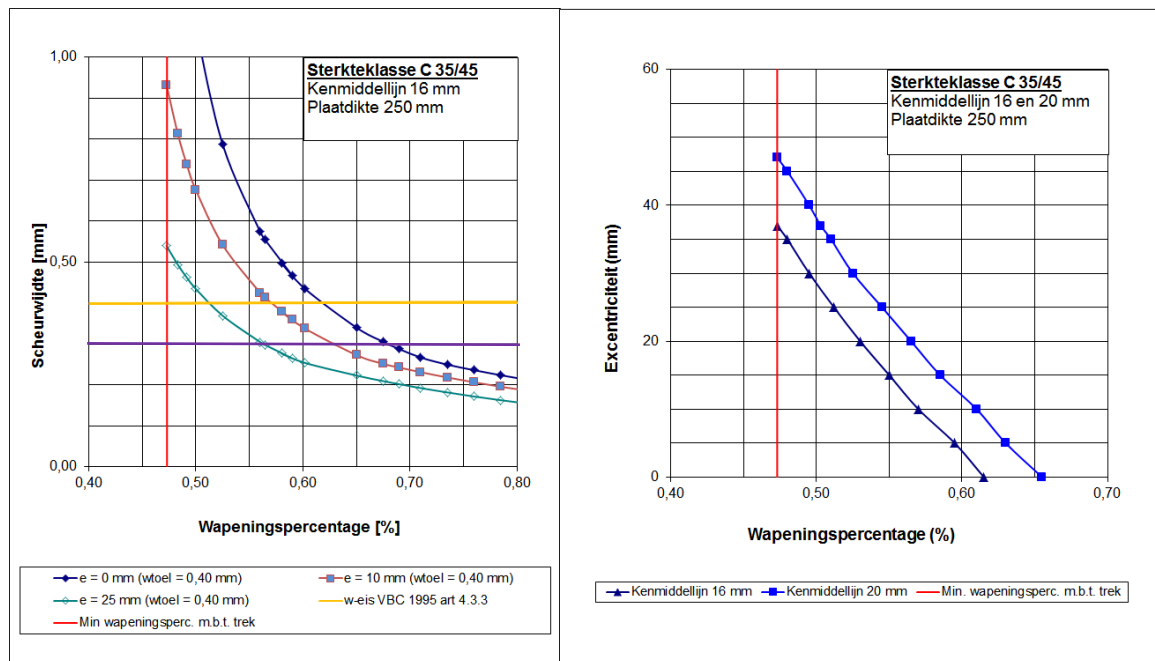
Recentelijk zijn op enkele locaties op de A50 dwarsscheuren ontstaan. De oorzaak staat nog niet vast. Het kunnen vorstscheuren zijn of reflectiescheuren. Het voorkomen van reflectiescheuren bij dgb zou een nieuw fenomeen zijn. De mogelijkheid van dwarsscheuren in zoab zijn in de jaren tachtig wel beschouwd, maar het risico werd beperkt geacht waardoor geen SAMI maar een kleeflaag wordt toegepast. Maar in dit licht is het wellicht gewenst om bij rijkswegen de toelaatbare karakteristieke scheurwijdte te verlagen, bijvoorbeeld tot 0,3 mm. Dit geeft uitgaande van de huidige excentriciteit een fractioneel hoger wapeningspercentage, maar bij een grotere excentriciteit kan met dezelfde hoeveelheid of zelf met minder wapening worden volstaan. Een verkenning van de mogelijkheden is gewenst.

3.1. *Hogere ligging van de langswapening in de doorsnede*

Tot 2008 werd door Rijkswaterstaat enkel centraal gelegen langswapening toegepast. Maar als de wapening hoger in de constructie wordt aangebracht, wordt de scheurwijdte aanzienlijk gereduceerd. In figuur 1 is voor een betondikte van 250 mm en sterkteklasse C35/45 voor een excentriciteit van 0, 10 en 25 mm, de voor het wapeningspercentage berekende karakteristieke scheurwijdte weergegeven.

Bij een toelaatbare scheurwijdte van 0,40 mm en een excentriciteit van 0, 10 en 25 mm bedragen de wapeningspercentages achtereenvolgens 0.62, 0.57 en 0.52. Wanneer de toelaatbare scheurwijdte wordt verlaagd naar 0,30 mm, bedraagt het wapeningspercentage respectievelijk 0.67, 0.63 en 0.57.

Het in de praktijk toegepaste hoeveelheid wapening van 0,70% zou al volstaan om aan de strengere eis van 0,30 mm tegemoet te komen bij een centrale ligging van de wapening (excentriciteit=0). Bij een scheurwijdte-eis van 0,40 mm kan de benodigde hoeveelheid wapening met 18% worden teruggebracht (van 0,70% naar 0,52%).



Figuur 1. Effect hogere ligging wapening en effect diameter langswapening [Stet, 11]

Wanneer de wapening hoger dan 25 mm excentrisch in de doorsnede wordt aangebracht, neemt de scheurwijdte nog verder af en/of kan het wapeningspercentage theoretisch nog verder worden teruggebracht. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat de trekstaaf niet is gevalideerd voor een grotere excentriciteit.

3.2. Kleinere kenmiddellijn

In figuur 1 is met een rode lijn het minimum wapeningspercentage voor ‘beton onder trek’ weergegeven. Dit is de hoeveelheid wapening welke nodig is om de kracht bij scheuren van het beton op te nemen zonder dat het staal de vloeigrens bereikt [11]. Feitelijk moet er een hoger percentage wapening worden toegepast om te zorgen dat de scheurvorming in de onvoltooide scheurvormingsfase blijft. Deze fase wordt gekenmerkt door een constante scheurwijdte en in de tijd een toename van de scheurafstand.

In het rechterdeel van figuur 1 is de standaard toegepaste kenmiddellijn van 20 mm ontwerptechnisch vergeleken met een kenmiddellijn van 16 mm. Een kenmiddellijn van 16 mm is in het recente verleden in drie van de vier weggedeelten van de A50 toegepast. Toepassing van staven Ø20 levert ten opzichte van Ø16 een theoretisch nadeel op van ca. 0,03% staal. Daarnaast is de verankeringslengte bij staven Ø16 kleiner dan bij Ø20. Bij het vlechten van de wapening is een verankeringslengte van 400 mm voldoende, in plaats van 500 mm. Dit is een quick-win waarbij door toepassing van staven Ø16 ca. 0,06% wapening wordt bespaard.

3.3. Grotere excentriciteit dan 25 mm; hogere ligging in de doorsnede

Vergroten van de excentriciteit kan een strengere scheurwijdte-eis inhouden. Bij een betondekking van $c_{\min} = 35$ mm is de excentriciteit bij een betondikte van 250 mm, 80 mm. Bij deze betondekking bedraagt de scheurwijdte-eis 0,20 mm. Om hier aan tegemoet te komen, moet de thans gangbare langswapening $\varnothing 20-180$ worden toegepast; de berekende scheurwijdte bedraagt 0,18 mm. M.a.w. de benodigde hoeveelheid wapening neemt door de strengere scheurwijdte-eis nauwelijks af. Wel neemt de scheurwijdte af, wat met betrekking tot het ontstaan van eventuele reflectiescheuren in het zoab vanuit het beton gunstig is.

Het minimum wapeningspercentage voor sterkteklasse C35/45 is bedraagt 0,47% (1183 mm²/m). Theoretisch is een besparing van 32% ten opzichte van de gangbare hoeveelheid $\varnothing 20-180$ (1745 mm²/m) mogelijk. Berekend is welke excentriciteit mogelijk is, uitgaande van het minimale wapeningspercentage en de bij de excentriciteit horende scheurwijdte-eis. De excentriciteit mag bij staven $\varnothing 20$ maximaal 57 mm bedragen ($c = 58$ mm; $w = 0,34$ mm); bij staven $\varnothing 16$ is maximaal $e = 77$ mm mogelijk ($c = 40$ mm; $w = 0,23$ mm). Deze beschouwing geeft aan dat de excentriciteit veel effect op de scheurwijdte heeft. Het bij het minimum wapeningspercentage behorende hartafstand is ten opzichte van de dekking te groot om een fijn verdeeld scheurenpatroon te kunnen krijgen ($\varnothing 20-264$ en $\varnothing 16-170$). Gelet op de wapeninggeometrie en de ervaringen in de vloerenwereld kan beter voor wapening met een kleinere kenmiddellijn worden gekozen. Deze fungeert dan beter als 'echte' krimpwapening.

4. *Stellingen*

- A. Gewapend beton scheurt altijd, maar de kunst is om dit niet zichtbaar te laten zijn.
- B. Validatie van het trekstaafmodel op basis van ook de A73 geeft aan dat het een geschikt model is voor het berekenen van de optredende scheurwijdte bij doorgaand gewapende betonverhardingen met een 'dikke dekking'. Omdat de huidige mogelijkheden van VENCON 2 aansluiten op de thans gangbare praktijk is het vooralsnog niet nodig is om de in Vencon 2.0 maximaal mogelijke excentrische ligging te vergroten.
- C. Bij hogere plaatsing van de wapening wordt het uitgangspunt van de 'dikke dekking' van het trekstaafmodel met centrische wapening geweld aan gedaan. Het model is voor 'dunne dekking' is hiervoor niet gevalideerd. Verhoging van de excentriciteit groter dan 25 mm is (nog) niet wenselijk.
- D. De theoretisch mogelijke staalbesparing geeft een onderzoekbehoefte aan en noodzaakt validatie van het trekstaafmodel voor 'dunne dekking'. De in dat geval benodigde wapeningsgeometrie valt buiten het huidige ervaringsgebied, maar de potentieel mogelijke besparing en/of constructieve verbeteringen rechtvaardigen onderzoek.
- E. Ten opzichte van de tot 2013 gebruikte ontwerprichtlijnen met centrische plaatsing zal toepassen van de nieuwe Specificatie voor Rijkswaterstaat leiden tot een aanzienlijke reductie van de scheurwijdte. Een quick-win is mogelijk door de betere krimpwerking van langswapening met een kleinere kenmiddellijn van 16 mm.

5. *Literatuur*

1. Update RWS betonspecs. Specificaties Ontwerp Doorgaand Gewapende Betonverhardingen. Infraquest, november 2013.
2. Ontwerptechnische zaken en standaarddetails provincie Noord-Brabant. Den Bosch, 2011.
3. VENCON 2.0. Software voor dimensionering van elastisch ondersteunde verhardingen van ongewapend en doorgaand gewapend beton'. CROW, Ede, september 2004.
4. Handleiding Wegenbouw – Ontwerp Verhardingen. Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde. Delft, december 1998.
5. Bouquet, G.Chr., Braam, CR, Lamers, H.J.M en M.J.A. Stet. Ontwikkeling Vencon 2.0 levert nieuw rekenmodel. Cement, nummer 5, 2004.
6. Stet, M.J.A. Achtergrondrapport rekenmodellen en formularia behorende bij Vencon 2.0. CROW, Ede , juli 2004.
7. Schießl, P. Einfluß von Rissen auf die Dauerhaftigkeit von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Heft 370, pp. 11-52, 1986.
8. McCullough, B.F. Criteria for the design and construction of continuously reinforced pavement.. Hoofdstuk 8 in 'Concrete pavements', redactie A.F. Stock. Elsevier, 1988.
9. Braam, C.R. en E.M. Horreweg. Scheurvorming in de doorgaand gewapende betonweg A50. Technische Universiteit Delft, 2003.
10. Braam, C. Controlled cracking of continuously reinforced concrete pavements; theory and verification of in-situ measurements. 5th International Workshop On Fundamental Modelling Of The Design And Performance Of Concrete Pavements. Istanbul, Turkey, 2004.
11. Stet, M.J.A. Handboek betonverhardingen. ISBN 90 6228 447 9, NUR 956. Reed Business Information. Doetinchem, 2003.