



Prefabbetonnen tribuneliggers: krachtswerking, schade en herstel

Tribunes inside (out)

“De verdediging vertoont scheuren” of “De defensie kraakt in al haar voegen”. Het zijn veelgebruikte voetbalcommentaren die vaak luchtig worden uitgesproken. Minder luchtig wordt het als deze termen van toepassing zijn op de bebouwing naast het betreffende sportveld. En dat is niet zelden het geval. De laatste jaren verschijnen regelmatig berichten over scheuren in (betonnen) tribunes. Daarbij wordt vaak vermeld dat er geen kans is op direct bezwijken, maar ook dat de exacte oorzaak niet is gevonden. Dat maakt nieuwsgierig naar de werkelijke oorzaak van deze scheuren.

Dit artikel gaat nader in op de krachtswerking in tribunes. De nadruk ligt hierbij op constructieve veiligheid, waarbij zaken als bouwfasering, E-moduli van liggers, 'drempel-effecten', scheurvorming en bezwijkgedrag aan bod zullen komen. Hierbij is gebruikgemaakt van een case.

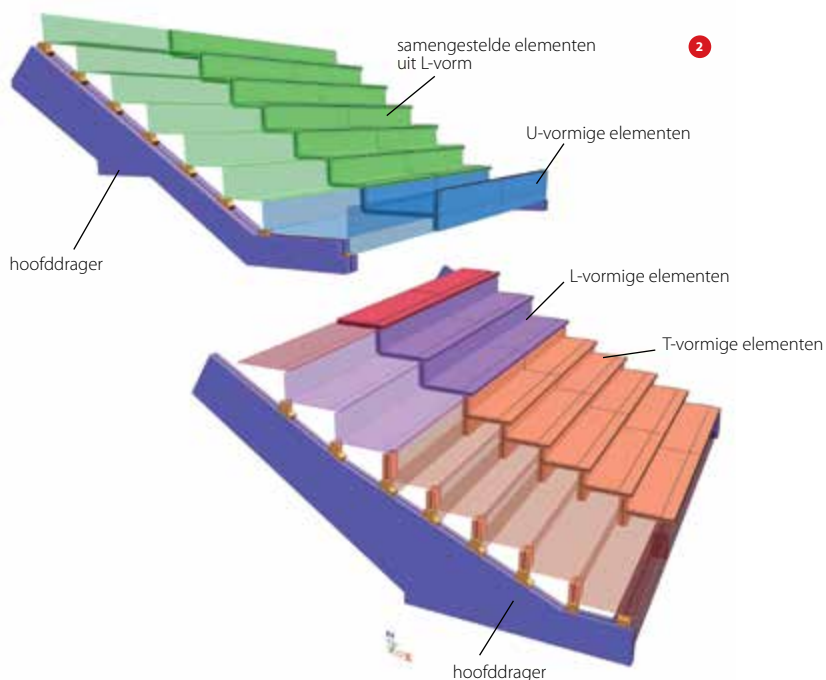
Opbouw constructie

Tribunes zijn vaak opgebouwd uit hoofddragers met dwars erop tribuneliggers. De doorsnede van die tribuneliggers is doorgaans een L-, T- of U-vorm en soms ook een samenstelling van deze vormen. Figuur 2 geeft twee principedoorsneden van een tribune met daarin aangegeven de verschillende elementen. Deze tribune zal als case verder worden uitgewerkt in dit artikel. De liggers worden individueel geproduceerd, gemonteerd en onderling gekoppeld door een aantal stalen doken. De liggers worden doorgaans ook individueel berekend: een ligger op twee steunpunten met een belastingsbreedte vormen de basis voor de wapeningsberekening. Echter, nadat de liggers zijn gekoppeld, ontstaat een samengesteld systeem. Hierin heersen andere krachten dan die aanvankelijk zijn aangenomen. Bovendien hebben veel tribunes een verlopende helling, wat zich vertaalt in liggers met verschillende hoogten en stijfheden. Ook dat beïnvloedt de krachtswerking.

Als er scheurvorming in een dergelijke constructie optreedt, moet de opzet van die constructie worden onderzocht. De constructieve uitgangspunten zijn vaak goed te herleiden uit tekeningen en berekeningen. Uit een quickscan door die documenten blijkt meestal dat de sommen op zich kloppen, evenals de vertaling van berekening naar tekening. Ervaring leert echter dat een quickscan alleen niet voldoende is om de werkelijke oorzaak van geconstateerde scheuren te achterhalen. In plaats daarvan kan voor een gefaseerde aanpak worden gekozen: een globale analyse en een detailanalyse.

Globale analyse

Door eerst een analyse van de gehele tribune, ofwel globale analyse, uit te voeren, wordt inzicht in het constructieve overallgedrag verkregen. Deze globale analyse geeft inzicht in de liggers die als kritische elementen worden aangewezen. Kritisch betekent hier dat vervormingen of krachtswerking anders zijn dan oorspronkelijk voorzien. Om grip te krijgen op de krachtswerking kan gebruik worden gemaakt van een EEM-pakket. Hierin wordt de tribune uit de case met 1D- en 2D-elementen in een 3D-omgeving geschematiseerd. Aan de gebruikte materialen worden quasi niet-lineaire eigenschappen toegekend, wat voorziet in een snelle berekeningswijze. Een variantenstudie waarin wordt gevarieerd met oplegcondities en (onderlinge) elasticiteitsmoduli van liggers kwantificeert de nieuwe globale krachtswerking.



Op basis van uitgevoerde variantenstudies is ten aanzien van de globale krachtswerking in de beschreven case een aantal conclusies getrokken:

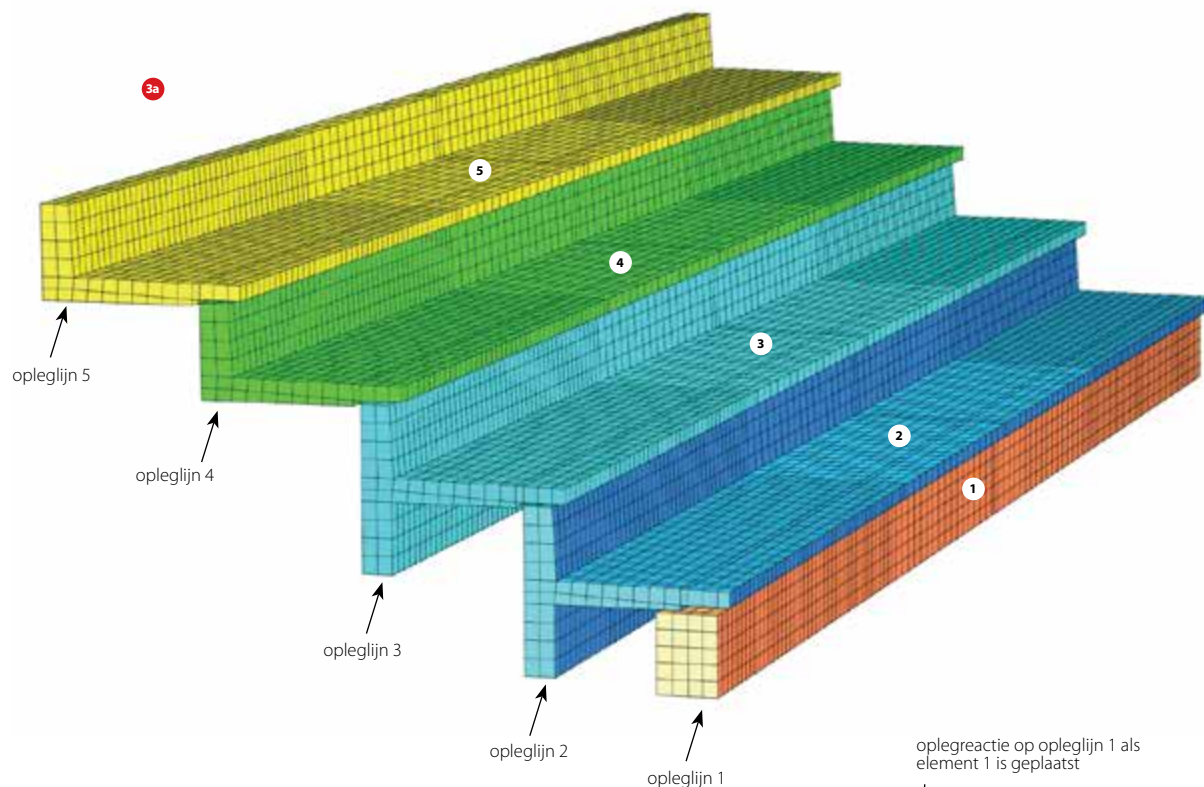
- Tijdens de bouwfase 'leunen' liggers op elkaar (wanneer niet ondersteund door stempels e.d.). Dit heeft eveneens invloed op de belasting in de individuele ligger. Dit effect is te kwantificeren door een staged calculation (bijv. in EEM-pakket DIANA) te maken waarbij de krachtswerking in de montagefase nauwkeurig kan worden geanalyseerd (fig. 3).
- In een samengesteld systeem (na aangieten doken) trekken liggers met een hogere stijfheid dan naastgelegen liggers relatief veel belasting naar zich toe. Dit effect wordt hier als 'drempel-effect' bestempeld. Studies wijzen uit dat dit drempel-effect ertoe kan leiden dat de toename van belasting op individuele elementen meer dan 100% kan zijn.

Detailanalyse

Aan de hand van de nieuwe globale krachtswerking kan de tribune op detailniveau worden geanalyseerd. Toetsing van maatgevende doorsneden op sterkte, bepaling van stijfheid en scheurvorming zijn de meest voor de hand liggende toetsen die eenvoudig met een snedesom zijn uit te voeren. Dwarskracht is, afhankelijk van de geldende norm, doorgaans geen probleem. Momentcapaciteit en scheurvorming zijn dat wel. In de praktijk wordt buigwapening vaak enkel ontworpen op sterkte, zonder rekening te houden met scheurvormingseisen.

Krachtswerking

Archiefonderzoek leert dat bij veel tribunes de verticale belasting (eigen gewicht en veranderlijke belasting) op papier door

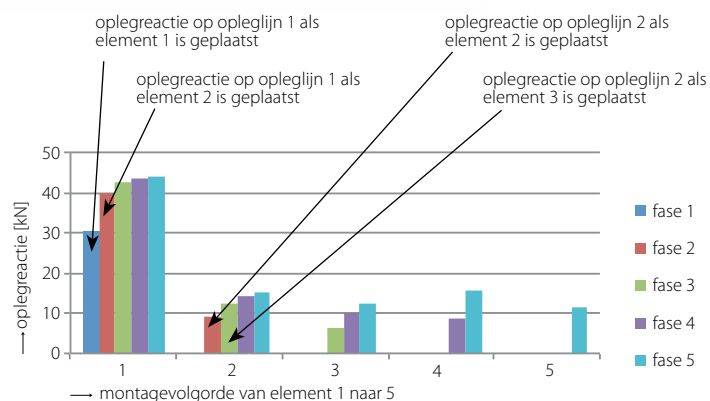


het lijf (of 'balkgedeelte') van de ligger wordt opgenomen, dus zonder rekening te houden met het horizontale deel. Echter, bij individueel voorkomen en in een samengesteld systeem verdraaien de hoofdtraagheidsassen. Dit leidt tot een andere spanningsverdeling dan aangenomen bij een rechthoekige balk. Dit wordt geïllustreerd in figuur 4. Bij gelijke belasting is te zien dat in het horizontale deel van de T-ligger trek-spanningen ontstaan (gele arcering). Bij onvoldoende aandacht voor het ontstaan van deze spanningen en het onvoldoende wapenen van de doorsnede is het risico op scheurvorming groot.

Scheurvorming

Archiefstukken laten zien dat er in het horizontale deel van de liggers veelal minder wapening aanwezig is dan het minimum-wapeningspercentage. In ogenschouw nemende dat de hoofdwapening enkel is bepaald voor sterkte en voor een rechthoekige doorsnede, leidt het belasten van een ligger tot duidelijk waarneembare scheurvorming. Deze scheurvorming treedt op in het horizontale deel vanwege de te geringe wapening, in het verticale deel omdat daar enkel rekening is gehouden met sterkte en niet met scheurvorming. Bij liggers met grote overspanning treedt deze scheurvorming al op bij belasting door het eigen gewicht.

Als niet aan de eisen met betrekking tot scheurvorming wordt voldaan, omdat er lokaal te weinig hoofdwapening is toegepast, rest de vraag hoe en waar er moet worden hersteld. Die vraag wordt beantwoord als er volledig inzicht is in het bezwijkgedrag.



Bezwijkgedrag

Inzage in het exacte bezwijkgedrag kan worden verkregen met behulp van een volledig driedimensionaal EEM-rekenmodel in DIANA. Hierin kan gebruik worden gemaakt van fysisch niet-lineair materiaalgedrag. In dit model kan beton scheuren en van individuele wapeningsstaven kan het spanningsniveau worden beoordeeld.

Figuur 5 laat de vervorming en het bijbehorende scheurpatroon van een T-vormige tribuneligger uit de case zien, bij belasting door eigen gewicht en permanente belasting.

Duidelijk zichtbaar zijn de scheuren in het balkgedeelte van de ligger en ook in het horizontale deel. Het feit dat al in een vroeg stadium dergelijke scheuren worden waargenomen, is te verklaren doordat bij de keuze van de wapening in het balkdeel niet genoeg rekening is gehouden met het optreden van scheuren. De berekende vervormingen, scheurwijdten uit het DIANA-model komen overeen met gemeten vervormingen in praktijksituaties.

- 4 Vergelijking spanningen in rechthoekige balk met T-vormige doorsnede
- 5 Scheurpatroon van de T-vormige tribuneliggers bij belasting door eigen gewicht en permanente belasting; scheurwijdte circa 0,3 mm

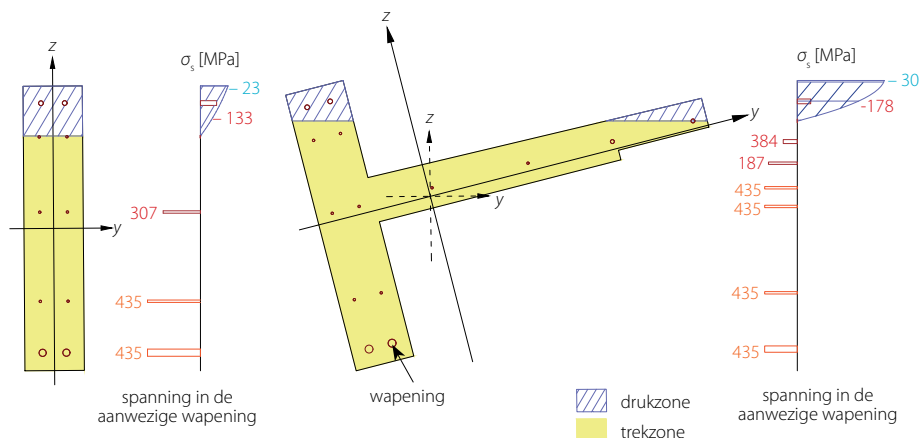
Figuur 6 laat het scheurpatroon van de T-vormige tribuneliggers zien, maar dan onder ULS-belasting. Verschil met figuur 5 is dat het aantal scheuren is toegenomen, net als de breedte van de scheuren. De wapening onder in het balkdeel vloeit nabij het bereiken van de ULS-belastingen, kort daarop gevolgd door het ontstaan van een diagonale scheur op een kwart van de over-spanning. Het verschijnen van deze scheur wordt als bezwijken aangemerkt, mede omdat hier een risico op instabiliteit van de ligger kan worden aangewezen.

Nu inzage is verkregen in het bezwijkgedrag kan er gericht worden bepaald waar er moet worden hersteld. Verdere beoordeling van het DIANA-model wijst uit dat versterking van het balkdeel aan de onderzijde effectief is. Vloeien van de hoofdwapening nabij ULS-belasting wordt hiermee voorkomen, net als het ontstaan van de diagonale scheur in het horizontale deel bij ULS-belasting. De dragende werking van de ligger is hiermee gegarandeerd. Er treedt daarmee geen instabiliteit van de ligger als geheel op.

Herstel

Als blijkt dat liggers niet voldoen, zijn aanvullende maatregelen nodig om de dragende werking te garanderen en ook om aan de vigerende normen te voldoen. Er zijn verschillende mogelijkheden de liggers te versterken. Het toevoegen van extra kolommen of stalen liggers behoort tot de mogelijkheden. In de case is gekozen om koolstofvezelwapping (Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP, foto 7)) in de vorm van lamellen toe te passen aan de onderzijde van de liggers. Behalve dat CFRP zeer effectief is in het verhogen van de capaciteit van betonnen elementen, is het eenvoudig aan te brengen vanwege het lage gewicht en neemt het weinig ruimte in. Hierdoor wordt het gebruik van ruimten onder tribunes niet verstoord. Tevens beïnvloedt de koolstofvezelwapping de stijfheids-

- 6 Scheurpatroon van de T-vormige tribuneliggers onder ULS-belasting; ca. 0,5 mm aan de bovenzijde, ca. 1,0 mm aan de onderzijde van het element



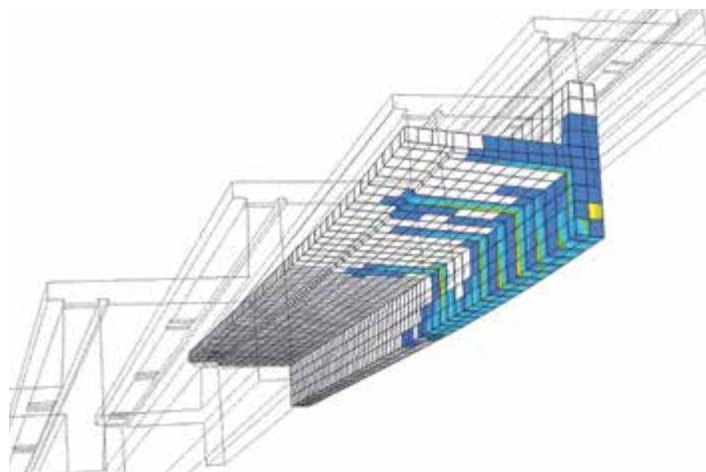
4

verhoudingen nagenoeg niet. Het materiaal zelf heeft een hoge E-modulus maar er is weinig nodig ten opzichte van een grote betondoorsnede. De globale krachtwerving wordt hierdoor niet beïnvloed.

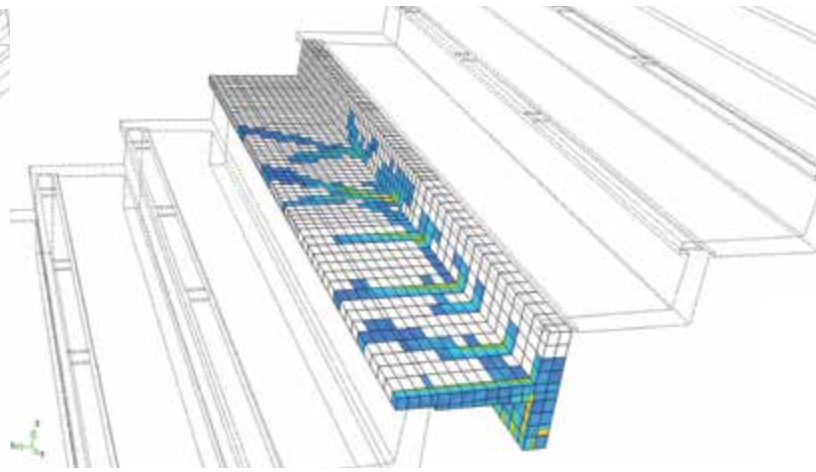
Engineering lamellen

Bij de engineering van CFRP-lamellen is een aantal hoofd zaken waar rekening mee moet worden gehouden. Allereerst is het van belang te kijken naar het initiële moment in de ligger. CFRP wordt aangebracht als er al een spanning aanwezig is in de constructie, namelijk het moment veroorzaakt door het eigen gewicht van de ligger en de aanwezige permanente belasting. De CFRP zal op dat moment nog niet bijdragen aan de krachtwerving. Pas bij toename van de belasting (supporters op de tribune) zal de CFRP op spanning komen. Hoe lager het initiële moment, hoe effectiever de lijmwapening zal bijdragen in het constructieve systeem. De momentcapaciteit kan vervolgens niet ongelimiteerd worden verhoogd door het toepassen van lijmwapening.

5



6



Afhankelijk van de kwaliteit van de traditionele wapening is normaliter een verhoging van de momentcapaciteit van circa 40% mogelijk, omdat er een grens zit aan de krachten die het beton kunnen worden ingeleid. Uitgangspunt is dat de momenten in de SLS kunnen worden opgenomen door de traditionele wapening zonder dat er sprake is van vloeien. Reden voor dit uitgangspunt is dat de CFRP-wapening relatief nieuw is en het langedureffect van een continu belaste lijmverbinding onvoldoende is onderzocht. Indien er toch sprake is van vloeien in de SLS zijn er wel speciale oplossingen mogelijk, zoals het gebruik van eindverankering. Bij oudere wapeningskwaliteiten moet rekening worden gehouden met het korte(re) rektraject vanaf het op spanning komen van de wapening tot het bereiken van de vloeigrens.

In de berekening moet vervolgens worden getoetst of de bestaande constructie, zonder CFRP, voldoende capaciteit heeft de belastingen op te nemen bij brand. Als dit niet het geval is, moet er brandwerende bescherming worden aangebracht.

Tot slot moet het onthechtingsmechanisme, conform CUR-Aanbeveling 91 'Versterken van gewapend-betonconstructies met uitwendig gelijmde koolstofvezelwapening' worden getoetst. In deze aanbeveling is hiervoor een vuistregel opgenomen. Om praktische redenen moet maximaal 0,5% rek worden toegelaten in de lamellen om zodoende relatief eenvoudig te kunnen voldoen aan de verankeringsstoetsen. Afhankelijk van het systeem mag echter in veel gevallen een hogere rek worden toegelaten. Bij het aanbrengen van de lamellen moet de ondergrond worden opgeruwd door te schuren met een lamellenschijf. Wanneer hechtsterkteproeven aantonen dat de hechting voldoende is ($>1,5 \text{ N/mm}^2$), kan worden gestart met het aanbrengen van de lamellen. De lamellen worden in een speciale lijmbak voorzien van epoxy en kunnen vervolgens worden aangebracht tegen de onderzijde van de liggers.



7

Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)

Koolstofvezelwapening wordt nu in circa drie hoofdvormen toegepast:

- *Lamellen*: bij lamellen of laminaten zijn de koolstofvezels vooraf via een pultrusieproces ingebed in een epoxy matrix. Deze lamellen zijn in verschillende afmetingen te krijgen variërend van 50 tot 150 mm breedte en 1,2 of 1,4 mm dikte. De lamellen worden veelal toegepast voor momentversterking.
- *Sheets*: sheets of doek zijn weefsels zonder epoxy matrix. De epoxy matrix wordt in het werk aangebracht, waardoor de doeken om een constructie (kolom, balk) kunnen worden gewikkeld. Door het omwikkelen kan bijvoorbeeld de dwarskrachtcapaciteit of de drukkracht in een kolom worden verhoogd.
- *Bars of inkeplamellen*: koolstofstaven of dunne 10 mm hoge lamellen (dikte 1,4 of 2,8 mm) die in de dekking van de betonconstructie worden aangebracht. Het voordeel is de driezijdige verlijming in plaats van een eenzijdige verlijming. Hierdoor kan de CFRP beter worden uitgenut. Het nadeel is echter dat er sleuven moeten worden gemaakt in de dekking van de betonconstructie, wat zeer arbeidsintensief is.

Bovenstaande rekenwijze is ook toegepast bij de engineering van de lamellen voor de liggers uit de case. Uit de berekening blijkt dat er geen aanvullende voorzieningen nodig zijn voor brand of speciale verankeringsmechanismen.

Conclusie

Om een zo goed mogelijk ontwerp van individuele tribuneliggers te krijgen, dient er in elke bouw- of gebruiksfase naast het solitaire ontwerp van de liggers ook te worden gekeken naar het totale ontwerp van een tribune. Deze globale krachtswerking beïnvloedt in sterke mate het ontwerp en kan oorzaak zijn van scheurvorming. Met geavanceerde rekenprogramma's is het mogelijk het (bezwijk)gedrag te analyseren en daarmee de exacte oorzaak van de scheuren aan te wijzen.

Aanbevelingen

Bij ontstane scheurvorming geldt dat bij frequent reinigen met water onder hoge druk elementen verder kunnen worden aangetast, wat de levensduur verkort. Aanbevolen wordt het schoonmaakregime aan te passen en maatregelen te nemen die verdere aantasting van wapening voorkomen.

Verder wordt aanbevolen om tijdens reguliere inspecties alert te zijn op duidelijk aanwezige scheurpatronen en grote scheurwijdten. Het beantwoorden van de vraag naar de oorzaak van deze scheuren samen met een doelgericht herstel, is de ideale voorbereiding voor een sportief en veilig seizoen. ☒