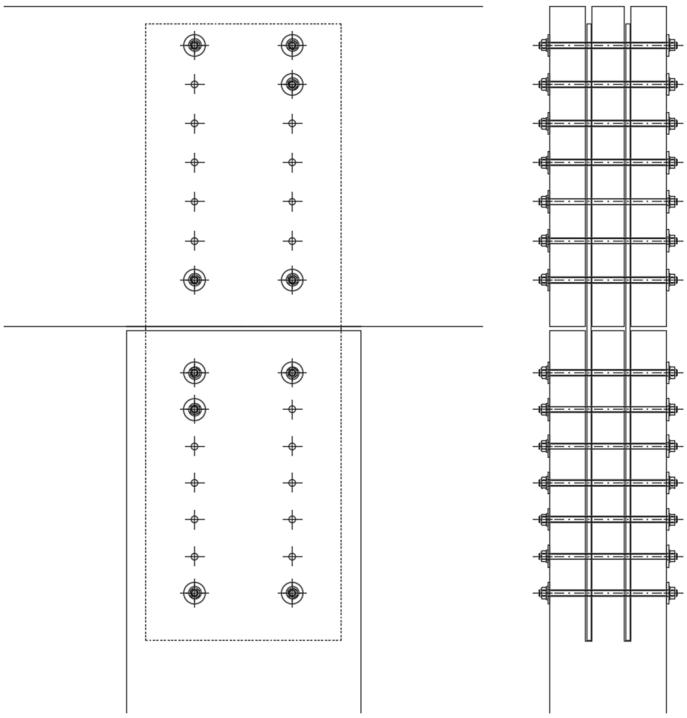
Momentoverdragende houtverbindingen met op afschuiving belaste deuvelvormige verbindingsmiddelen

Het n_{ef}-concept en de methode Porteous & Kermani kritisch bekeken

1. Toepassingsdomein en probleemstelling

Dit artikel behandelt momentoverdragende houtverbindingen met op afschuiving belaste deuvelvormige verbindingsmiddelen: bouten, deuvels, schroeven en nagels. Het toepassingsdomein omvat zowel hout-staalverbindingen, bijvoorbeeld met een ingesleufde stalen plaat, als hout-hout-hout-verbindingen met meerdere afschuivingsvlakken. Zo vallen verbindingen met ingelijmde draadstangen buiten het toepassingsdomein: hun mechanisch gedrag berust op een fundamenteel ander mechanisme dan dat van deuvelvormige verbindingsmiddelen, en wordt hier niet behandeld.



Als concreet voorbeeld gebruiken we doorheen dit artikel een verbinding tussen een ingeklemde houten kolom en een overkragende houten balk, uitgevoerd met een centraal ingebrachte stalen plaat en boutverbindingen. Dat voorbeeld dient uitsluitend ter illustratie: de besproken principes en knelpunten gelden op vergelijkbare wijze voor andere deuveltypes en voor hout-hout-hout-configuraties.

Zo'n verbinding oogt eenvoudig, maar is dat niet. Voor vergelijkbare, momentoverdragende verbindingen in staal- of betonconstructies bestaan doorgaans uitgewerkte en eenduidige normatieve rekenmethoden; voor houtverbindingen van dit type ontbreekt zo'n kader.

Dit artikel zet uiteen waarom dat zo is, en maakt daarbij een onderscheid tussen twee zaken die in de praktijk vaak door elkaar worden gebruikt: de zuivere rigid-body-theorie enerzijds, en de veelgebruikte methode van Porteous & Kermani anderzijds, die op die theorie voortbouwt maar er niet mee samenvalt.

2. Het normatieve kader van Eurocode 5

2.1. Wat de norm wél regelt

Noch NBN EN 1995-1-1+A1:2015, noch het ontwerp van de nieuwe norm FprEN 1995-1-1:2025 levert een rekenmethode aan voor een momentoverdragende verbinding met deuvelvormige verbindingsmiddelen. §8.1.1 stelt dat een verbinding moet worden beoordeeld rekening houdend met de krachten en momenten die erop inwerken. Die bepaling heeft echter uitsluitend het karakter van een algemeen verificatieprincipe en geeft geen richtlijnen voor de interne krachtverdeling binnen zo'n verbinding.

§11.3.1(6) van FprEN 1995-1-1:2025 bevat de instructie dat voor een momentoverdragende verbinding de berekening van alle bevestigingsmiddelen moet worden uitgevoerd om het meest belaste bevestigingsmiddel te identificeren, zonder aan te geven hoe de krachtenverdeling tussen de individuele bevestigingsmiddelen moet worden bepaald. §11.4.3(2) en tabel 11.21 bevatten wel geometrische detailleringsregels, maar die zijn uitdrukkelijk beperkt tot LVL/GLVL met bevestigingsmiddelen in een cirkelvormig patroon.

2.2. Wat de norm niet regelt: de rol van beproeving

De Eurocodes sluiten het gebruik van niet-volledig genormeerde verbindingen niet uit, maar koppelen dit aan een geijkte procedure. EN 1990, §7.3(1)-(2), laat toe dat fysische beproeving wordt gebruikt om ontwerpparameters of het gedrag van een constructiedeel te bepalen, precies in situaties waarin geen geschikt rekenmodel voorhanden is. §7.3(3)-(4) stelt daarbij als voorwaarde dat het vereiste betrouwbaarheidsniveau wordt gewaarborgd, rekening houdend met zowel de statistische onzekerheid van een beperkt aantal proeven als de onzekerheid inherent aan het gehanteerde rekenmodel. Bijlage D van de norm werkt dit statistische kader verder uit.

Deze weg is echter niet vrijblijvend. Een proefonderbouwd ontwerp vergt een voldoende aantal proeven om het vereiste betrouwbaarheidsniveau statistisch aan te tonen, wat aanzienlijke kosten en doorlooptijd met zich meebrengt. Dat maakt beproeving vooral haalbaar wanneer eenzelfde verbindingsdetail op repetitieve wijze wordt toegepast, zodat de kosten van de proefcampagne over een groot aantal exemplaren kunnen worden gespreid. Bij een unieke, niet-repetitieve verbinding is een dergelijke onderbouwing door beproeving in de praktijk vaak

moeilijk haalbaar, net in de situatie waarin geen enkele normatieve rekenmethode voorhanden is om op terug te vallen.

3. Het n_{ef}-concept: twee mechanismen in één empirische formule

3.1. De rigid-body-theorie van Lantos

§8.1.1(4) van NBN EN 1995-1-1:2015 schrijft voor dat de effectieve karakteristieke sterkte van in één rij evenwijdig aan de vezelrichting geplaatste verbindingsmiddelen wordt bepaald via een meewerkend aantal bevestigingsmiddelen, n_{ef}. De grondslag van dit concept is het onderzoek van Lantos (1969). Lantos vertrekt niet van de rigid-body-theorie in haar meest zuivere vorm, waarbij de te verbinden elementen onvervormbaar worden verondersteld, maar houdt er juist rekening mee dat zowel de houten elementen als de verbindingsmiddelen zich elastisch gedragen. Dat leidt tot de vaststelling dat de uiterste verbindingsmiddelen in een rij meer last overbrengen dan de meer centrale, in functie van de stijfheid van de elementen, de stijfheid van de verbindingsmiddelen, hun onderlinge afstand en hun aantal. Dit resulteert in een equivalent aantal verbindingsmiddelen, n_{ef}.

Deze uitdrukking gaat evenwel niet zonder meer op wanneer het centrale element aanzienlijk stijver is dan het omringende hout, zoals bij een ingesleufde stalen plaat. In dat geval verandert de verhouding tussen de stijfheden van de tussenkomende elementen wezenlijk, waardoor de afwijking van de optredende krachten in de verbindingsmiddelen ten opzichte van de zuivere rigid-body-theorie anders is dan bij hout-op-houtverbindingen.

3.2. Brosse breuk door trekspanning loodrecht op de vezel

Rond een verbindingsmiddel treden niet alleen stuikspanningen op, maar ook trek- en afschuifspanningen, zowel evenwijdig met de krachtwerking als loodrecht daarop. Jorissen (1998) toonde dit reeds aan in zijn proefschrift over houtverbindingen met deuvelvormige bevestigingsmiddelen: bij lineair geschikte verbindingsmiddelen neemt de trekspanning door accumulatie toe, terwijl het effect van dat mechanisme net afneemt naarmate de afstand tussen de verbindingsmiddelen groter wordt. Het spanningseffect en het geometrisch effect werken dus in tegengestelde richting.

Jorissen vatte de resultaten van 950 proeven op hout-op-houtverbindingen samen in een empirisch regressiemodel, waarin de invloed van de tussenafstand tussen de bevestigingsmiddelen expliciet is verwerkt. Uit die regressie volgt dat, voor het onderzochte verbindingstype, de weerstand toeneemt naarmate de bevestigingsmiddelen verder uit elkaar liggen: het spanningseffect domineert er dus over het geometrisch effect. Het model maakt echter geen onderscheid tussen de twee onderliggende oorzaken van sterktereductie, de niet-uniforme

krachtverdeling enerzijds en brosse splijting anderzijds. Een verdere vereenvoudiging van dat model vindt haar toepassing in de huidige benadering van n_{ef} in Eurocode 5.

3.3. Waarom het onderscheid van belang is

Yurrita & Cabrero (2021) wijzen erop dat de huidige benadering in Eurocode 5, waarbij n_{ef} als één globale reductieparameter wordt gebruikt, verschillende bezwijkmechanismen samenbrengt en onvoldoende onderscheid maakt tussen ductiele en brosse bezwijkvormen. Dat onderscheid is net noodzakelijk om het werkelijke gedrag van deuvelverbindingen correct te beoordelen. Aquino et al. (2026) bevestigen dit vanuit een numerieke benadering: de huidige n_{ef}-formule omvat twee afzonderlijke fysische effecten, de niet-uniforme lastverdeling ten gevolge van elastische vervorming en de opbouw van trekspanningen loodrecht op de vezel tussen opeenvolgende bevestigingsmiddelen, zonder deze afzonderlijk te modelleren. Het toepassingsgebied van dergelijke empirische formules moet daarom, zoals deze auteurs benadrukken, tot duidelijk gedefinieerde grenzen beperkt blijven; een extrapolatie ervan, bijvoorbeeld naar staal-houtverbindingen, kan tot systematische en niet-conservatieve afwijkingen leiden.

4. Van axiaal belaste rijen naar momentoverdragende verbindingen

De experimentele basis van Jorissen, net als de eerdere analyse van Lantos, betreft lineaire rijen bevestigingsmiddelen die onder eenzelfde axiale belastingsrichting worden aangesproken, met verbindingsmiddelen van gelijke stijfheid. Bij een momentoverdragende verbinding is dat wezenlijk anders: de krachtvector per bevestigingsmiddel verschilt er in grootte én richting, en de stijfheid van een verbindingsmiddel is functie van de hoek tussen die krachtvector en de vezelrichting, een hoek die voor elk bevestigingsmiddel binnen dezelfde verbinding verschillend is.

Ook de bepaling van de splijtsterkte loodrecht op de houtvezel, vergelijking 8.4 van NBN EN 1995-1-1:2015 en verder uitgewerkt in §11.6 van FprEN 1995-1-1:2025, is afgeleid voor een configuratie waarin de krachtcomponent loodrecht op de vezel voor alle bevestigingsmiddelen gelijkgericht en gelijkmatig verdeeld is, zodat de trekkracht in het hoofdelement het grootst is bij het bevestigingsmiddel dat het verst van de belaste rand ligt. Aan die veronderstelling is bij een momentoverdragende verbinding niet voldaan: de krachtvectoren verschillen per bevestigingsmiddel in grootte en richting, zodat de totale treklast ter hoogte van elk verbindingsmiddel afzonderlijk moet worden nagegaan. De toepassing van de empirisch bepaalde n_{ef}-reductiefactor, en van de standaardformule voor splijtsterkte, op een momentoverdragende verbinding veronderstelt dus telkens een extrapolatie naar een fundamenteel andere belastingsconfiguratie dan die waarvoor beide werden ontwikkeld en gevalideerd.

5. De methode Porteous & Kermani

5.1. Uitgangspunten: rigid-body-theorie met correcties

De in de ingenieurspraktijk veelgebruikte methode van Porteous & Kermani (Structural Timber Design to Eurocode 5, hoofdstuk 12) is een poging om de bestaande bepalingen van EN 1995-1-1 toe te passen op momentoverdragende houtverbindingen met deuvelvormige verbindingsmiddelen, waarvoor de norm zelf geen specifieke rekenmethodiek voorziet. De methode is opgebouwd rond de rigid-body-theorie: de krachten in de verbindingsmiddelen worden in essentie berekend alsof de verbinding zich als een star lichaam gedraagt, aangevuld met correcties die op de in Eurocode 5 opgenomen principes voor deuvelverbindingen voortbouwen.

Dat maakt de methode iets anders dan de zuivere rigid-body-berekening: waar die laatste geen rekening houdt met enige sterktereductie, probeert Porteous & Kermani via de bestaande EC5-bepalingen een correctie in te bouwen. Voor zover kan worden nagegaan, is deze specifieke toepassing echter niet onderbouwd met eigen resultaten van eindige-elementensimulaties of experimentele proeven op momentoverdragende verbindingen. De methode wordt gepresenteerd als een theoretische afleiding van bestaande normprincipes, niet als een door proeven of numerieke validatie onderbouwde ontwerpmethode.

5.2. Wat de methode niet toetst

Bij de sterktecontrole van de verbindingsleden gaat de methode ervan uit dat de splijtformule van Eurocode 5, vergelijking 8.4, niet rechtstreeks van toepassing is op deze belastingsconfiguratie. Dat is, zoals hierboven toegelicht, ook correct, gelet op de afwijkende configuratie. Op basis daarvan wordt de controle in de methode echter beperkt tot een verificatie van de afschuifsterkte van de betrokken elementen, zonder evenwel een aangepaste toetsing van de trekspanning loodrecht op de vezel.

Dat is problematisch, want EN 1995-1-1 bevat in §8.1.4(1)P een dwingende grondbeginsel-bepaling, met een analoge bepaling in §11.6 van FprEN 1995-1-1:2025, die voorschrijft dat, telkens wanneer een kracht onder een hoek met de vezelrichting inwerkt, rekening moet worden gehouden met de mogelijkheid van splijten veroorzaakt door de trekcomponent loodrecht op de vezel. Die verificatie is dus niet facultatief. Dat de standaardformule niet zonder meer toepasbaar is op deze configuratie, ontslaat de ontwerper met andere woorden niet van de plicht om de splijtcontrole via een aangepaste beoordeling alsnog uit te voeren.

5.3. Plaats binnen het ontwerpproces

Dit alles betekent niet dat de methode van Porteous & Kermani nutteloos is, integendeel. Het blijft, ondanks de hierboven geschetste beperkingen, een van de meest toegankelijke en meest gebruikte methoden in de ingenieurspraktijk om momentoverdragende houtverbindingen met deuvelvormige bevestigingsmiddelen te dimensioneren. Ze wordt evenwel in geen enkele norm,

noch in NBN EN 1995-1-1:2015, noch in FprEN 1995-1-1:2025, aanbevolen of van toepassing verklaard, en ontslaat de ontwerper dan ook niet van de plicht om de onderliggende aannames en het toepassingsgebied ervan kritisch te beoordelen.

De methode dient dan ook te worden beschouwd als een eerste stap binnen een breder ontwerpproces, nuttig als analytisch uitgangspunt, maar niet als een op zichzelf staande, afdoende gevalideerde dimensioneringsmethode. Aanvullende verificatie is steeds aangewezen. Bij een unieke toepassing is deze verificatie via beproeving vaak moeilijk haalbaar, wat een des te kritischer blik op de gehanteerde aannames vereist.

6. Wetenschappelijke stand van zaken

Het mechanisme van brosse breuk door scheurvorming evenwijdig met de vezelrichting wordt inmiddels door een reeks onafhankelijke publicaties gedocumenteerd, ook specifiek voor momentoverdragende verbindingen met een ingesleufde stalen plaat. Yurrita, Cabrero & Quenneville (2019) onderzochten precies dat verbindingstype en stelden vast dat de capaciteit ervan kan worden bepaald door brosse breuk, veeleer dan door een ductiel bezwijkmechanisme. Rebouças, Mehdipour, Branco & Lourenço (2022) beschrijven een laboratoriumproef op een momentoverdragende verbinding met gelamineerd hout, stalen bouten en een ingesleufde stalen plaat, waarbij de proef werd afgebroken wegens scheurvorming die aan hoge trekspanning loodrecht op de vezel werd toegeschreven. Diezelfde publicatie stelt bovendien vast dat het door de rigid-body-benadering veronderstelde vaste rotatiecentrum experimenteel niet standhoudt: het rotatiecentrum van de verbinding bleek tijdens de belasting te verschuiven.

Ook niet-lineaire eindige-elementensimulaties van dit verbindingstype tonen doorgaans aan dat de trekspanningen loodrecht op de vezel, rond de meest belaste bevestigingsmiddelen, de aanvaardbare grenswaarde met een aanzienlijke marge kunnen overschrijden, een bevinding die aansluit bij de experimentele literatuur hierboven. Een recente vervolgstudie van Aquino et al. (2025) veralgemeent het numerieke model van deze onderzoeksgroep voor het eerst naar situaties met gecombineerde krachten en buigend moment, en stelt vast dat normaalkracht en buigend moment op onderscheiden wijze interageren bij het bezwijken van de verbinding. Dat zo'n fundamentele veralgemening pas recent werd gepubliceerd, bevestigt dat een betrouwbare mechanische beschrijving van momentbelaste dowelverbindingen nog niet volledig voorhanden is: dit blijft een actief onderzoeksdomein, waarin experimentele validatie nog een centrale rol speelt.

7. Besluit

Uit het voorgaande volgt een aantal conclusies die relevant zijn voor elke ontwerper die met dit verbindingstype te maken krijgt:

- Geen enkele versie van de toepasselijke Eurocode-norm, huidig noch ontwerp, bevat een rekenmethode voor een momentoverdragende houtverbinding met deuvelvormige verbindingsmiddelen.
- De rigid-body-theorie is het theoretische vertrekpunt voor dit soort verbindingen, maar volstaat op zichzelf niet: ze houdt geen rekening met de niet-uniforme stijfheidsverdeling, noch met brosse bezwijkmechanismen.
- De methode Porteous & Kermani bouwt op die rigid-body-theorie voort met correcties ontleend aan Eurocode 5, maar extrapoleert daarbij een empirische reductiefactor buiten haar gevalideerd toepassingsgebied, en verzuimt een dwingende normcontrole van trekspanning loodrecht op de vezel systematisch uit te voeren.
- Het mechanisme van brosse breuk door trekspanning loodrecht op de vezel is voor dit verbindingstype experimenteel gedocumenteerd.
- Overeenkomstig het beginsel van EN 1990, §7.3, vergt de toepassing van een niet-genormeerde rekenmethode een onderbouwing door beproeving, waarbij zowel de statistische onzekerheid als de modelonzekerheid in rekening worden gebracht.
- Die onderbouwing door beproeving is niet vrijblijvend en vergt een voldoende aantal proeven; ze is daardoor vooral haalbaar bij repetitieve toepassing van eenzelfde verbindingsdetail. Bij een unieke, niet-repetitieve verbinding is een dergelijke onderbouwing in de praktijk vaak moeilijk realiseerbaar, net in de situatie waarin geen enkele normatieve rekenmethode voorhanden is om op terug te vallen.

8. Referenties

- NBN EN 1990:2023, Eurocode: Grondslagen van het constructief ontwerp (§7.3, Bijlage D).
- NBN EN 1995-1-1+A1:2015, Eurocode 5: Ontwerp en berekening van houtconstructies, Deel 1-1.
- FprEN 1995-1-1:2025 (E), definitief ontwerp, Eurocode 5: Design of timber structures, Part 1-1.
- Aquino et al. (2026). “Numerical simulation of the effective number of fasteners in dowelled timber connections.” Materials and Structures, 59:282.
- Aquino et al. (2025). “Numerical and fracture mechanics-based simulations of brittle failure in dowelled timber connections under in-plane multiaxial forces and bending moment.” Engineering Structures, 343(B), 119398.
- Porteous, J. & Kermani, A., Structural Timber Design to Eurocode 5, hoofdstuk 12.
- Rebouças et al. (2022). “Ductile Moment-Resisting Timber Connections: A Review.” Buildings, 12(2), 240.
- Yurrita, Cabrero & Quenneville (2019). “Brittle failure in the parallel-to-grain direction of multiple shear softwood timber connections with slotted-in steel plates and dowel-type fasteners.” Construction and Building Materials, 216, 296–313.
- Yurrita & Cabrero (2021). “On the need of distinguishing ductile and brittle failure modes in timber connections with dowel-type fasteners.” Engineering Structures, 242, 112496.

- Jorissen, A. (1998). Double shear timber connections with dowel-type fasteners. Doctoraatsproefschrift, TU Delft.
- Lantos, G. (1969). “Load distribution in a row of fasteners subjected to lateral load.” Wood Science, 1(3), 129–136.
- Blass, H.J., Timber Engineering, Step 1, Lecture C15.
- Blass, H.J. & Sandhaas, C. (2017), Timber Engineering, Principles for design, Lecture E11.

Van den Bossche Tom
09/2026