



WZMOCNIENIE KONSTRUKCJI ŻELBETOWYCH NA ŚCINANIE

Jak radzić sobie z nowymi
problemami za pomocą
znanych rozwiązań



Wersja 1.0
Październik 2024 r.

SPIS TREŚCI

1. Wprowadzenie i tło.....	2
2. Zachowanie się betonu przy ścinaniu	3
3. Projektowanie elementów betonowych na ścinanie.....	5
3.1 Zasady ogólne	5
3.2 Projektowanie bez zbrojenia na ścinanie wg norm EN 1992-1-1 oraz SIA 262:2013	5
3.3 Projektowanie ze zbrojeniem na ścinanie wg norm EN 1992-1-1 oraz SIA 262:2013	5
4. Podejścia do wzmacniania elementów z niedostatkami wytrzymałości na ścinanie	8
4.1 Zwiększenie szerokości oraz/lub wysokość sekcji	8
4.2 Zwiększenie długości podpory	9
4.3 Zwiększenie wytrzymałości na zginanie	9
4.4 Zwiększenie wytrzymałości na ścinanie przy użyciu laminatów	10
4.5 Zwiększenie wytrzymałości na ścinanie za pomocą zbrojenia wklejanego	10
4.6 Rozwiązania specjalne i kombinacje rozwiązań	11
5. Przegląd kwalifikacji wklejanego zbrojenia na ścinanie	12
6. Projektowanie konstrukcji i ich detali przy użyciu prętów gwintowanych HAS / HAS-U	13
6.1 Weryfikacja rozpórek ściskanych	13
6.2 Weryfikacja rozpórek ściskanych	15
6.3 Wymagania dotyczące projektowania szczegółowego zbrojenia wzmacniającego	17
7. Przykład projektu	21
8. Przegląd modułu PROFIS Engineering do wzmocnienia wytrzymałości na ścinanie	23
9. Rozwiązania Hilti do wzmacniania wytrzymałości na ścinanie	24
10. Podsumowanie.....	24
11. Odnośniki	25

1. WPROWADZENIE I TŁO

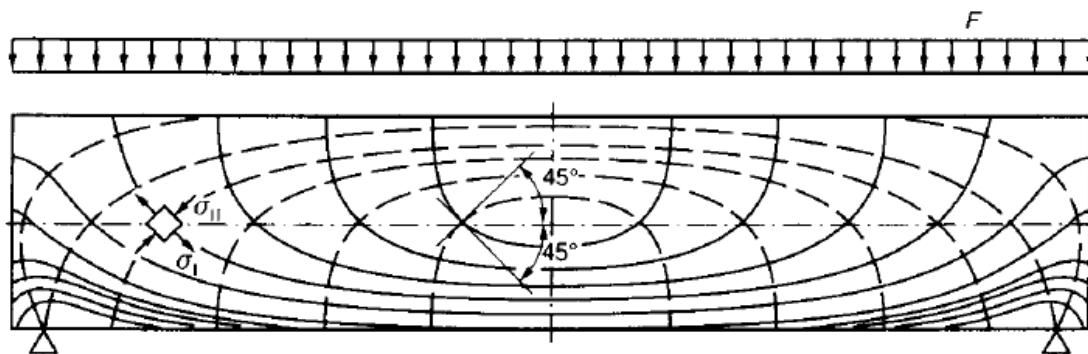
Od dwudziestu lat branżę budowlaną poddaje się coraz większej kontroli, aby zmniejszyć jej oddziaływanie na środowisko, a także naciskom, aby wykorzystywać istniejące zasoby budowlane w celu sprostania rosnącym wymaganiom społeczno-gospodarczym. Jest to bardziej powszechne w środowiskach miejskich, gdzie trwałość eksploatacyjna znacznej części budynków i mostów o konstrukcji żelbetowej (RC) dobiega końca i trzeba je remontować lub wyburzać. Dodatkowo potrzeba wzmocnienia konstrukcji może wynikać z kilku innych czynników: zmiany sposobu użytkowania lub klasy obciążenia, powiększenia powierzchni budynku, wprowadzenia nowych przepisów budowlanych, ujawnienia błędów lub innych braków podczas początkowej realizacji oraz przeciwdziałania innym problemom z trwałością spowodowanym znanymi zagrożeniami, takimi jak pożary i trzęsienia ziemi.

W zależności od wymagań klienta, aktualnego stanu budowli oraz jej znaczenia społecznego, kulturowego i historycznego, inżynier może uznać wzmocnienie istniejącego budynku lub mostu za lepszy wybór niż wyburzenie i budowa od nowa, przy czym dowody wskazują, że wzmocnienie istniejącego budynku lub mostu – od zatrzymania działalności w budynku lub moście do przywrócenia go do użytkowania – trwa od 15 do 70% krócej niż budowa nowej budowli. Zaletą tą łączy się z redukcją zużycia zasobów o 10 do 75% w wyniku oszczędności pracy i materiałów [1].

Po lokalnej i globalnej ocenie istniejącej konstrukcji inżynier musi wybrać jedną z wielu metod wzmocnienia, aby zaradzić wszelkim niedostatkom wytrzymałości na rozciąganie, ściskanie, zginanie, ścinanie, ścinanie przebijające, skręcania itp., przy jednoczesnym spełnieniu wymagań użytkowych. Wzmocnienie na poziomie globalnym jest możliwe na przykład poprzez zastosowanie obudowy szkieletowej (np. dodatkowych ścian usztywniających), zainstalowanie mikropali lub założenie izolacji podłoża lub urządzeń rozpraszających energię w przypadku obciążenia trzęsieniem ziemi. Wzmocnienie zaś lokalnych, indywidualnych elementów obejmuje nakładki betonowe; płaszczy z betonu, stali lub polimeru wzmocnionego włóknami (FRP), FRP montowany na zewnątrz lub blisko powierzchni, zewnętrzne sprężanie lub wewnętrznie nakładane (montowane) zbrojenie stalowe [2]. Większość projektów wzmacniających zwykle obejmuje wiele technik pozwalających skutecznie przeciwstawić się dodatkowym obciążeniom i przenieść je z miejsca oddziaływania na fundamenty.

W wielu miejscach na świecie znaczna większość istniejących budynków i infrastruktury budowlanej jest obecnie w trakcie wzmacniania lub ma zostać wzmocniona, co wymaga dokładnego rozważenia przyjęcia najbardziej odpowiednich technik interwencyjnych. W artykule przedstawiono zagadnienie ścinania w betonie, podsumowano istniejące metody stosowane w celu wzmocnienia poszczególnych elementów betonowych oraz przedstawiono najnowsze rozwiązanie firmy Hilti w zakresie wzmacniania wykorzystujące wklejane pręty gwintowane, które zachowują się jak zbrojenie zwiększające wytrzymałość na ścinanie, które w 2024 r. uzyskało ogólne zezwolenie na stosowanie go jako techniki budowlanej (**aBG**) niemieckiego instytutu techniki budowlanej Deutsches Institut für Bautechnik (**DIBt**).

2. ZACHOWANIE SIĘ BETONU PRZY ŚCINANIU



Rys. 1: Naprężenia rozciągające i ściskające w belce pod równomiernie rozłożonym obciążeniem, przedstawione odpowiednio liniami ciągłymi i przerywanymi [3].

W typowej belce pod wpływem równomiernego obciążenia poprzecznego względem jej długości, naprężenia ściskające wytwarzane przez podpory tworzą łuk (linie przerywane), natomiast naprężenia rozciągające zakrzywiają się w krzywą łańcuchową lub łańcuch podwieszony (linie ciągłe). Te dwa główne naprężenia, oznaczone jako σ_I oraz σ_{II} , działają prostopadle do siebie na reprezentatywnym elemencie kwadratowym na Rys. 1, generując naprężenie „ścinające” wzdłuż boków elementu, jeśli obróci się go tak, aby jego boki były równoległe do osi podłużnej i poprzecznej belki. Powstałe naprężenie ścinające rozciąga i ściska przeciwległe narożniki. To naprężenie ścinające jest największe w środku głębokości belki – gdzie jest nachylona pod kątem $\pm 45^\circ$ do obu naprężeń – i zmniejsza się do zera w pobliżu górnej i dolnej powierzchni, gdzie dominują naprężenia ściskające i rozciągające.

Ponieważ beton ma wysoką wytrzymałość na ściskanie, ale niską wytrzymałość na rozciąganie, będzie pękał prostopadle do naprężeń rozciągających przy określonym obciążeniu. Aby dodatkowo zachować integralność belki, umieszcza się zbrojenie, aby utrzymać te pęknięcia w dopuszczalnych granicach. W stanie spękania belka wytrzymuje obciążenie skutkiem połączenia następujących czynników: (1) niespękanego betonu w strefie ściskania; (2) działania kołującego obecnego zbrojenia podłużnego; oraz (3) blokadę kruszywa w poprzek pęknięć w strefie rozciągania. Jednakże te trzy czynniki o niesystematycznym charakterze działając jednocześnie nie generują wystarczająco dużej wytrzymałości na rozciąganie, aby zapobiec pękaniu betonu pod wpływem stosunkowo małej składowej rozciągającej naprężenia ścinającego, co prowadzi do pęknięć rozwijających się ukośnie w pobliżu podpór, gdzie znaczny nacisk w górę wywierany przez środek belki wytrzymuje przyłożone obciążenie skierowane w dół. Aby skutecznie zwiększyć wytrzymałość na ścinanie, trzeba dodać specjalne zbrojenie na ścinanie – zwane strzemionami, ogniwami lub ściągami – które aktywuje się po utworzeniu pierwszych ukośnych pęknięć, ograniczając ich szerokość w dopuszczalnych granicach [4].

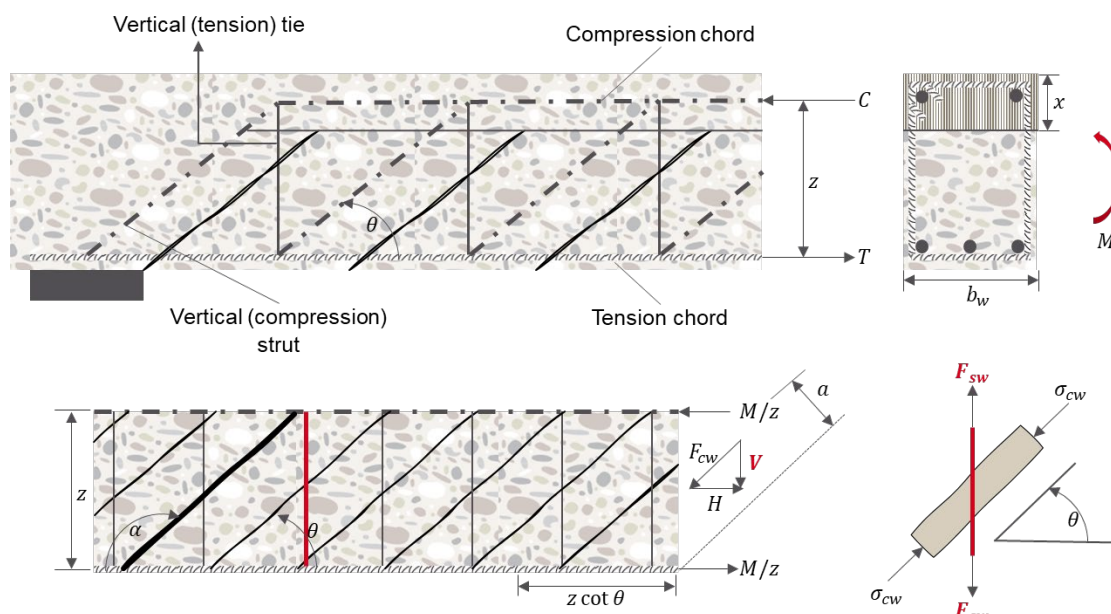
Obok zbrojenia podłużnego belka zawiera również zbrojenie na ścinanie i składa się zatem z czterech elementów przedstawionych na Rys. 2:

1. Pas ściskany betonu na skutek zginania,
2. Pas rozciągany zginanego zbrojenia stalowego poddawany rozciąganiu na skutek zginania,
3. Rozpórki betonowe ściskane pomiędzy ukośnymi pęknięciami spowodowanymi ścinaniem i
4. Pionowe wiązania rozciągane, które łączą pasy ściskane i rozciągane.

Tworzy to analogiczną kratownicę składającą się z rozpórek i ściągów, którą wraz z modelem pola naprężeń po raz pierwszy stworzyli Mörsch [5] i Ritter [3] w latach 1900-tych na podstawie wzorów pęknięć zaobserwowanych podczas testów obciążeniowych belek żelbetonowych i która pomaga projektantom w wizualizacji ścieżek obciążenia.

Później, w latach 1960-tych teoria plastyczności zapewniła teoretyczne podstawy do projektowania modeli typu „strut-and-tie (rozpórka i ściągacz)”. Zgodnie z tą teorią każdy stan równowagi w elemencie

– model kratownicy jest jednym z takich stanów równowagi pomiędzy przyłożonymi obciążeniami i reakcjami podporowymi – który nie narusza warunków plastyczności wymagających odkształceń plastycznych aż do momentu uplastycznienia zbrojenia, zapewnia dolną granicę oszacowania rzeczywistej wytrzymałości. Daje to ostrożne szacunki i tworzy solidną podstawę do projektowania elementów ze zbrojeniem na ścinanie we wszystkich współczesnych normach projektowania betonu.



Rys. 2: Belka betonowa ze zbrojeniem na ścinanie, reprezentowana przez kratownicę Mörscha-Rittera zawierającą pasy ściskane i rozciągane, nachyloną rozpórkę ściskaną oraz pionowy ściągi rozciągany [5] i [6].

Aby model kratownicy działał niezawodnie w przypadku ścinania, zbrojenie na ścinanie musi obejmować wokół (lub zahaczać o) pas ściskany jako ściągi rozciągany, aby umożliwić przenoszenie sił w tym węźle. W praktyce warunek ten można spełnić poprzez wiązanie, wytrzymałość betonu na rozciąganie lub najczęściej poprzez bezpośrednie podpory, gdzie zbrojenie na ścinanie wygina się z obecnością zbrojenia podłużnego lub bez niego w strefie ściskania [7].

3. PROJEKTOWANIE ELEMENTÓW BETONOWYCH NA ŚCINANIE

3.1 Zasady ogólne

W projektowaniu rozróżnia się elementy betonowe ze zbrojeniem na ścinanie i bez niego, przy czym to drugie to lekko obciążone płyty stropowe i niektóre fundamenty, które zazwyczaj mają szerszy przekrój poprzeczny i nie podlegają obciążeniom skupionym. W przypadku elementów obu typów projektant najpierw sprawdza wymagania dotyczące zbrojenia na ścinanie w oparciu o wzory wyprowadzone empirycznie.

3.2 Projektowanie bez zbrojenia na ścinanie wg norm EN 1992-1-1 oraz SIA 262:2013

Projektowanie wytrzymałych na ścinanie elementów betonowych bez zbrojenia na ścinanie polega na równaniach empirycznych, które wywodzą się z dziesięcioleci szeroko zakrojonych testów przeprowadzanych przez ekspertów na całym świecie, z kolei wywodzących się z tradycji krajowych i testów lokalnych. Chociaż prowadzi to do braku jednolitego i ustalonego modelu fizycznego w odpowiednich normach, wyniki są zwykle porównywalne w większości warunków. Na przykład jednolity tekst normy EN 1992-1-1:2004 zaleca następujące wyrażenie określające wytrzymałość elementów betonowych bez zbrojenia na ścinanie, z modyfikacjami określonych parametrów, takich jak $C_{Rd,c}$ oraz k , zawarte w różnych załącznikach krajowych:

- Wytrzymałość na ścinanie bez zbrojenia na ścinanie: $V_{Rd,c} = \left[C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{\frac{1}{3}} \right] b_w \cdot d \quad (1)$

W normie SIA 262:2013 wytrzymałość elementów betonowych bez zbrojenia na ścinanie wyrażono nieco inaczej:

- Wytrzymałość na ścinanie bez zbrojenia na ścinanie: $V_{Rd} = k_d \tau_{cd} d_v b_w \quad (2)$

3.3 Projektowanie ze zbrojeniem na ścinanie wg norm EN 1992-1-1 oraz SIA 262:2013

Kluczowa cecha nowoczesnych standardów projektowych zakłada, że jeśli beton sam w sobie nie jest w stanie wytrzymać wszystkich działających naprężeń ścinających, każde dodane zbrojenie na ścinanie, takie jak to na Rys. 2, musi jedynie wytrzymać wszystkie naprężenia. Dlatego podobnie jak ukośne elementy ściskane w kratownicy o otwartym kształcie, zmieniający kąt nachylenia, θ , będzie odgrywać znaczącą rolę w określeniu maksymalnej wytrzymałości betonowej rozpórki ściskanej przed jej zmiążdżeniem, $V_{Rd,max}$ z wytrzymałości zbrojenia na ścinanie przed jego uplastycznieniem, $V_{Rd,s}$, przy czym całkowita wytrzymałość na ścinanie to mniejsza z tych dwóch wartości, V_{Rd} . Tam, gdzie projekt wymaga zbrojenia na ścinanie, jego wymaganą ilość określają trzy kryteria:

1. Minimalna ilość, aby uniknąć uplastycznienia zbrojenia na ścinanie przy wystąpieniu pierwszych pęknięć od ścinania, $A_{sw,min}$
2. Zeczywista ilość zbrojenia na ścinanie wymagana do przeniesienia obciążenia obliczeniowego, A_{sw} .
3. Stosunek zbrojenia na ścinanie do przekroju betonu, ρ_w , co powoduje uplastycznienie zbrojenia na ścinanie i zapobiega nagłemu i gwałtownemu zniszczeniu ściskanego betonu pod wpływem obciążenia ściskającego.

Normy projektowe, takie jak EN 1992-1-1:2004 i SIA 262:2013, określają wielkość zbrojenia na ścinanie za pomocą „strut-and-tie (rozpórka i ściągnacz)” lub „modelu pola naprężeń” pokazanego na Rys. 3, stosując spójny wzór obliczeniowy jedynie z niewielką zmianą granic kąta rozpórki, θ . A zatem:

- Siła, przy której strzemię osiąga granicę plastyczności: $F_{wi} = A_{sw} \cdot f_{ywd}$ (3)

- Liczba strzemion w obrębie Δx : $n = \frac{z \cdot \cot(\alpha)}{s}$ (4)

- Siły we wszystkich strzemionach w obrębie Δx : $V_{Rd,s} = f_{ywd} \cdot A_{sw} \cdot \frac{z \cdot \cot \theta}{s}$ (5)

- Jeśli strzemiona są nachylone ($\alpha \neq 90^\circ$): $V_{Rd,s} = f_{ywd} \cdot \frac{A_{sw} \cdot z}{s} \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha$ (6)

- normy EN 1992-1-1:2004 nachylenie strzemienia wynosi: $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$

- Odpowiednie minimalne zbrojenie na ścinanie: $\rho_{w,min} = 0,08 \cdot \frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}}$ (7)

- Wg normy SIA 262:2013 nachylenie strzemienia wynosi: $45^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$

- Odpowiednie minimalne zbrojenie na ścinanie: $\rho_{w,min} = 0,001 \cdot \sqrt{\frac{f_{ck}}{30}} \cdot \frac{500}{f_{sk}}$ (8)

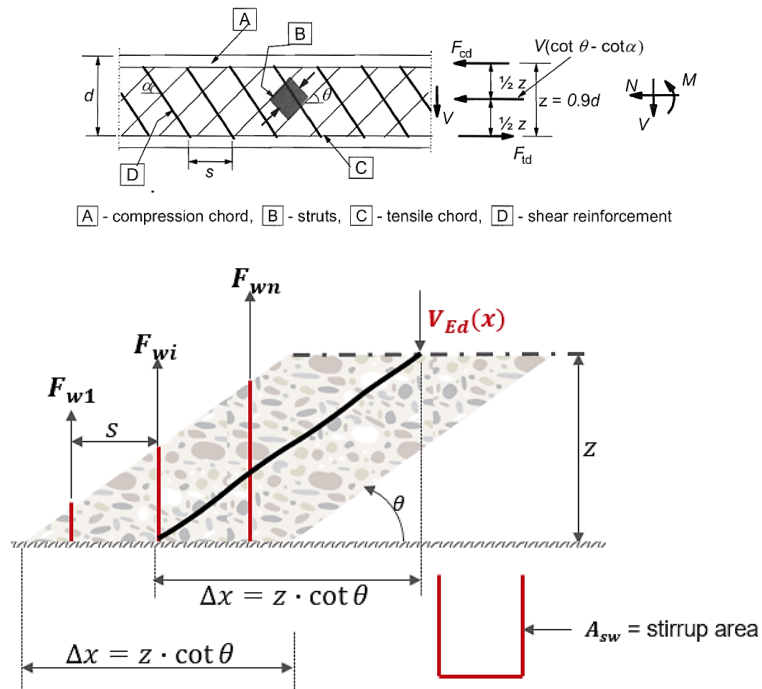
Maksymalna wytrzymałość na ścinanie ograniczona przez zgniatanie rozpórki ściskanej:

$$V_{Rd,max} = \frac{b_w \cdot z \cdot \alpha_{cw} \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta} \quad (9)$$

Wg tego samego modelu maksymalną efektywną wielkość zbrojenia na ścinanie oblicza się przy użyciu następującego wyrażenia (zakładając, że $\cot \theta = 1$):

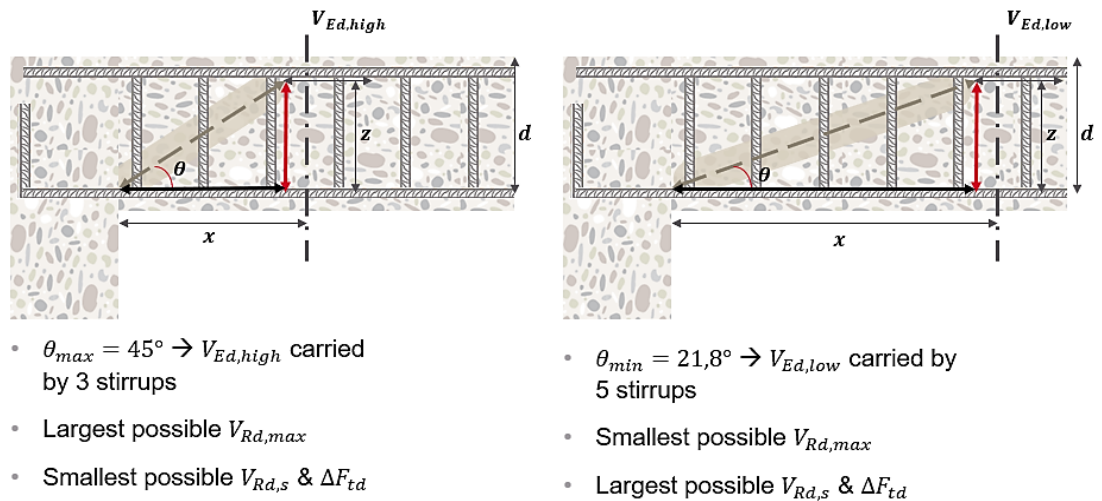
$$\frac{A_{sw,max} \cdot f_{ywd}}{b_w \cdot s} \leq \frac{1}{2} \alpha_{cw} \cdot v_1 \cdot f_{cd} \quad (10)$$

Przy założeniu zmiennego nachylenia rozpórki: $\left(\frac{A_{sw}}{s}\right)_{max} \leq \frac{\alpha_{cw} \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{f_{ywd}} \cdot b_w \cdot \sin^2 \theta$ (11)



Rys. 3: Model obliczeniowy wytrzymałości na ścinanie ze zbrojeniem na ścinanie: (na górze) Model Strut-and-Tie z normy EN 1992-1-1:2004 [8]; (na dole) Szkic z strzemionami pionowymi

Kąt nachylenia, θ , zwiększa się proporcjonalnie do wielkości siły ścinającej przyłożonej do elementu betonowego, a projektowanie wytrzymałości na ścinanie zgodnie z nowoczesnymi standardami projektowymi umożliwia inżynierowi budowlanemu wybór w określonym zakresie większego nachylenia rozpórki, co zwiększa wytrzymałość rozpórki, aby poradziła sobie z większymi siłami ścinającymi, V_{Ed} . Zmniejsza to udział zbrojenia na ścinanie i dlatego potrzeba więcej zbrojenia, aby spełnić ten warunek, jak pokazano na rysunku 4.



Rys. 4: Schematyczne przedstawienie wpływu nachylenia rozpórki na wytrzymałość rozpórki ściskanej i zbrojenia na ścinanie: (po lewej) maksymalne; oraz (po prawej) minimalne nachylenie dopuszczalne

I odwrotnie, optymalizacja projektu ścinania poprzez zmniejszenie nachylenia rozpórki, θ , przy danym obciążeniu ścinającym, V_{Ed} , prowadzi do:

- Większa siła w nachylonej rozpórce powodująca kruszenie betonu pod mniejszym obciążeniem ścinającym, V_{Ed} . Obciążenie ścinające, pod jakim beton się kruszy, $V_{Rd,max}$ o maksymalna wytrzymałość sekcji na ścinanie, a zapewnienie większej wytrzymałości poprzez dodatkowe zbrojenie, $V_{Rd,s}$, staje się niepotrzebne. Większe ilości przesuwają przypadek zniszczenia w stronę zmiążdżenia rozpórek betonowych.
- Szerszy rozkład pionowych cięgien oznacza, że więcej strzemion jest w stanie wytrzymać obciążenie ścinające, V_{Ed} , co prowadzi do mniejszej ilości wymaganego zbrojenia na ścinanie.
- Większa siła rozciągająca nałożona na zbrojenie podłużne, ΔF_{td} , co wymaga zakotwienia na podporach.

4. PODEJŚCIA DO WZMACNIANIA ELEMENTÓW Z NIEDOSTATKIEM WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCINANIE

Wg obu wyżej wymienionych norm projektowych wytrzymałość elementu betonowego na ścinanie zależy od następujących parametrów:

- Wytrzymałość betonu, f_{ck}
- Szerokość sekcji, b_w , i jego wysokość h
- Efektywna głębokość zbrojenia na zginanie od górnej powierzchni włókna ściskanego, d
- Długość podpory, a_v
- Ilość zbrojenia podłużnego, A_{sl}
- Ilość zbrojenia na ścinanie (zwanego także zbrojeniem poprzecznym), A_{sw}

Metody lub interwencje dotychczas zwykle stosowane w celu wzmocnienia poszczególnych elementów betonowych zwiększają wytrzymałość elementu na ścinanie, ale wiążą się z kompromisem pod względem inwazyjności, kosztów, dostępności i innych parametrów. Chociaż poprawa jednego lub kilku z tych parametrów zwiększa wytrzymałość na ścinanie, w istniejącej konstrukcji wytrzymałości betonu (a) nie można modyfikować *a posteriori*, a dodanie większej liczby podpór, na przykład dodanie kolumn do belek lub belek do płyt, zmniejsza smukłość elementu. Jednakże te dodatkowe podpory będą musiały przenosić obciążenie na fundamenty. W zależności od wymagań funkcjonalnych możliwe jest ulepszenie jednego lub więcej parametrów (b) do (f) poprzez zastosowanie różnych interwencji, jak pokazano w poniższych akapitach. Zazwyczaj tylko część interwencji wzmocniających wykonywana jest przy użyciu firmowych produktów, a częściej rozwiązania dostosowuje się do konkretnego projektu.

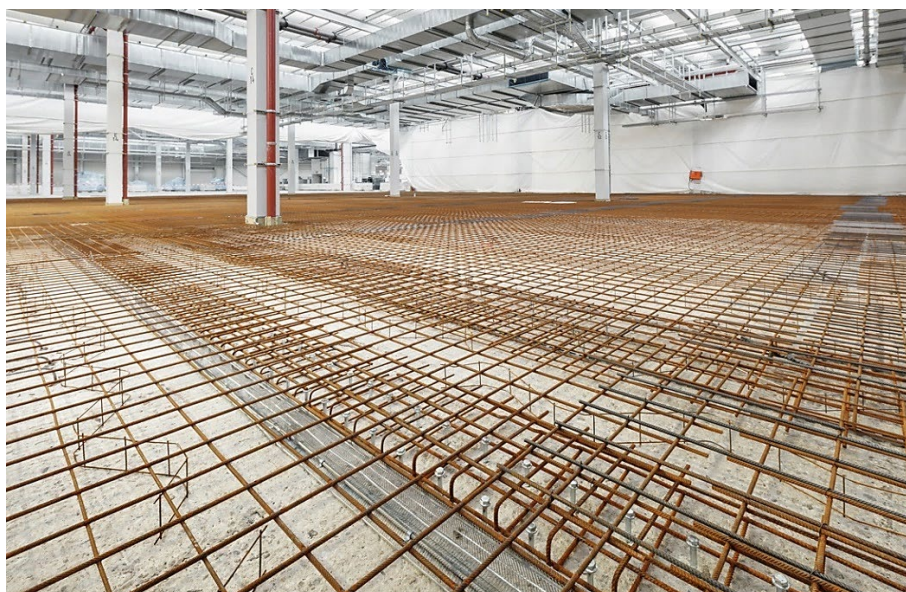
4.1 Zwiększenie szerokości oraz/lub wysokość sekcji

Szerokość i efektywną głębokość sekcji elementu betonowego można zwiększyć, stosując nakładkę betonową na elementy płaskie, takie jak płyty stropowe, fundamenty i ściany, lub płaszcz żelbetowy na elementy liniowe, takie jak belki i kolumny. Jak pokazano na rysunkach Rys. 5 i Rys. 6, oba podejścia jednocześnie zwiększają wytrzymałość na zginanie i sztywność, zmniejszając w ten sposób również ugięcie, i są przydatne, gdy niedostatek wytrzymałości na ścinanie nie jest jedyną wadą, którą należy usunąć. W scenariuszach, w których elementy wymagają wzmocnienia wyłącznie wytrzymałości na ścinanie, oba podejścia mogą mieć zauważalne wady:

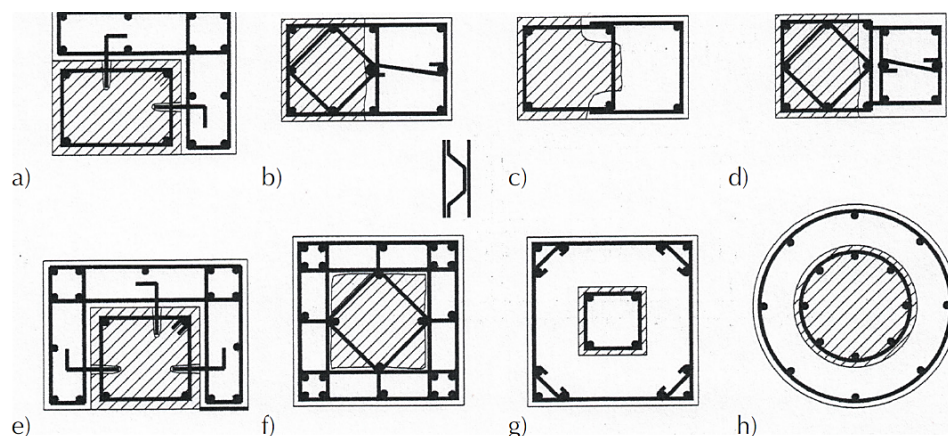
- Nakładka lub płaszcz betonowy dodaje znaczny dodatkowy ciężar, który wpływa na inne elementy na ścieżce obciążenia, w tym na fundament.
- Co więcej, przyrost głębokości efektywnej jest nawet mniejszy niż grubość nakładki, co skutkuje ułożeniem głębokości efektywnej w środku ciężkości całego zbrojenia na rozciąganie w istniejącym elemencie betonowym i w nakładce, czyli poniżej tego zbrojenia nakładki.
- To wzmocnienie koncentruje się w sąsiedztwie podpór, gdzie ścinanie jest największe.

Przykłady firmowych rozwiązań w tej branży:

Serie Hilti HCC: HCC-K, HCC-B, HCC-HUS4, oraz HCC-U



Rys. 5: Przykład zbrojenia wklejanego stosowanego w nakładkach betonowych



Rys. 6: Przykłady płaszcza betonowego zaczerpnięte z [2]

4.2 Zwiększenie długości podpory

Zwiększenie rozmiaru kolumny lub podpory rozkłada obciążenie ścinające na większą powierzchnię, co zmniejsza średnie naprężenie ścinające poprzez przesunięcie punktu podparcia bliżej środka rozpiętości belki lub płyty. Można zastosować kilka rozwiązań:

Przykłady rozwiązań w tej branży: stalowe elementy wzmacniające montowane po wykonaniu konstrukcji; przedłużenie podpór betonowych (np. wsporniki).

4.3 Zwiększenie wytrzymałości na zginanie

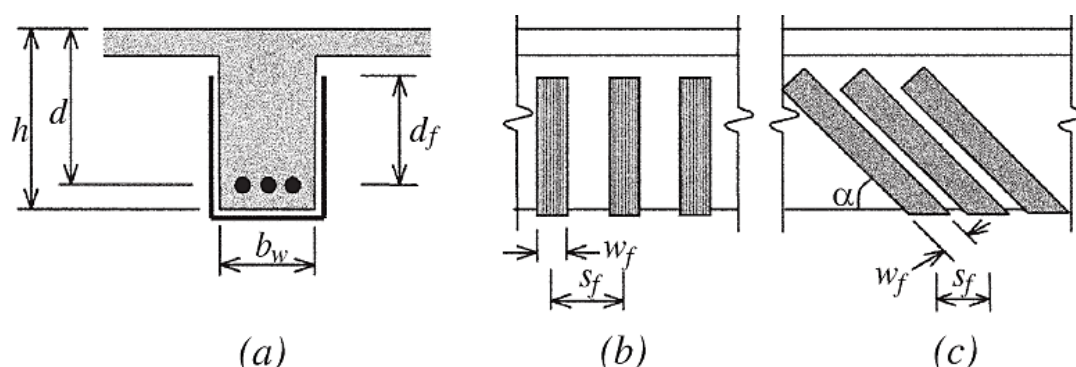
Zwiększenie ilości zbrojenia na zginanie zwiększa ogólną ciągliwość, sztywność sekcji i zmniejsza szerokość pęknięć poprzez poprawę blokady kruszywa na pęknięciach, co z kolei zwiększa wytrzymałość na ścinanie. Zbrojenie na zginanie można wzmocnić poprzez zastosowanie klejonych laminatów lub zbrojenia montowanego blisko powierzchni na podporach i w połowie rozpiętości sekcji, gdzie wymagania dotyczące zginania są największe, przy czym zbrojenie to składa się z polimerów wzmocnionych włóknem lub płyt stalowych.

Efekt zwiększenia wytrzymałości na zginanie ma „nieproporcjonalny” wpływ na wytrzymałość na ścinanie; na przykład podwojenie ilości zbrojenia na zginanie zgodnie z równaniem 6.2a z normy EN1992-1-1 skutkuje wzrostem wytrzymałości na ścinanie $V_{Rd,c}$ o nie więcej niż 25%.

Przykłady rozwiązań w tej branży: Laminaty CFK, laminaty ze stali z pamięcią kształtu, pręty ze stali z pamięcią kształtu, zbrojenie montowane blisko powierzchni.

4.4 Zwiększenie wytrzymałości na ścinanie przy użyciu laminatów

Jak pokazano na przykładzie na Rys. 7, elementy o niedostatecznej wytrzymałości na ścinanie, takie jak belki, można także wzmocniać poprzez naklejenie laminatów na boki prostopadłe do długości belki lub na pochyłości. Zazwyczaj metodę tę uważa się za wysoce skuteczną, lecz końcowe zakotwienie laminatów może stwarzać problemy, gdy są poddawane dużym obciążeniom.



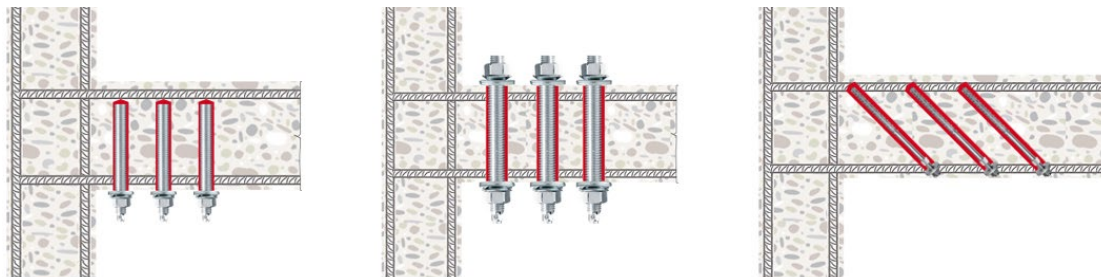
Rys. 7: Zastosowanie laminatów FRP prostopadłe lub pod kątem do osi podłużnej belki, odtworzone z Rys. 11.4 [9]

4.5 Zwiększenie wytrzymałości na ścinanie za pomocą zbrojenia wklejanego

Alternatywne i prostsze rozwiązanie polega na wierceniu otworów w elemencie betonowym po obu stronach i mocowaniu gwintowanych prętów stalowych za pomocą nakrętki i podkładek, znane również jako „skręcenie przelotowe”. Gdy beton zaczyna pękać, do zaangażowania zbrojenia niezbędne jest wypełnienie odpowiednią zaprawą szczeliny pierścieniowej między prętem gwintowanym a otworem. Pomaga to utrzymać szerokość pęknięć w granicach użyteczności i zapobiega korozji zbrojenia, co ma zasadnicze znaczenie dla zapewnienia zamierzonej trwałości eksploatacyjnej projektowanej konstrukcji. Podobnie jak w przypadku zbrojenia wklejanego, przewiercanie elementów betonowych powoduje ryzyko przecięcia lub uszkodzenia zbrojenia podłużnego, które bywa szczególnie gęste w pobliżu podpór (zwykle sztywnych wsporników), a w których wymagania dotyczące zginania są wysokie. Ryzyko to można łagodzić stosując detektory zbrojenia, które pomagają w wykryciu zbrojenia na zginanie po obu stronach elementu przed wierceniem.

Niemniej jednak w większości przypadków przewiercać płyt albo nie można, albo nie należy, bo prowadzi do częściowego zamocowania elementów wzmocniających z jednej strony. Takie podejście jest mniej inwazyjne niż przewiercanie elementu betonowego na całej długości, ale odnosi się do niego pewne zastrzeżenie: zasady szczegółowego projektowania we wszystkich nowoczesnych normach, takich jak Sekcja 9.2.2 normy EN1992-1-1, wymagają aby standardowe zbrojenie na ścinanie, takie jak strzemiona, obejmowały i "zamykały" zbrojenie podłużne lub przynajmniej było zakotwione na warstwach zbrojenia podłużnego lub ponad nimi. Oznacza to, że jedyną możliwą przyczyną awarii jest uplastycznienie stali. Jednak w tym przypadku takie kotwienie może nie być możliwe i dlatego wymaga weryfikacji kotwienia i instalacji, w ogólności, tam, gdzie jest to możliwe, na podstawie szczegółowych testów.

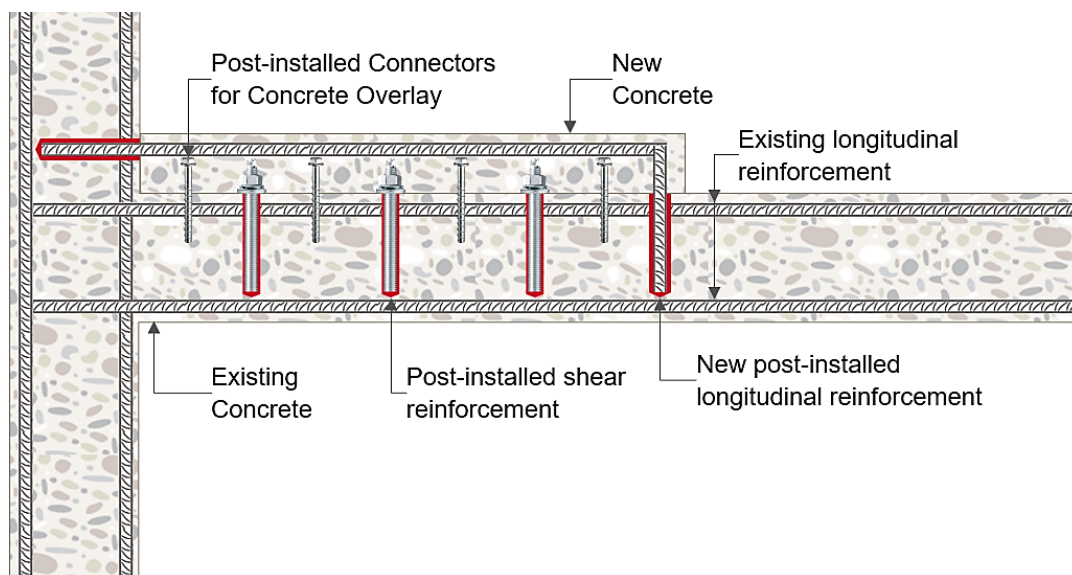
Obecnie dostępne rozwiązania Hilti: Na Rys. 8 przedstawiono trzy różne możliwości użycia **prętów gwintowanych HZA-P i HAS(-U)** zamocowanych częściowo (HZA-P i HAS(-U)) oraz skręconych przelotowo (tylko HAS(-U)).



Rys. 8: Zwiększenie zbrojenia na ścinanie za pomocą: (a) częściowo zamocowanych prętów HAS(-U) zainstalowanych prostopadle do osi podłużnej belki; (b) skręconych przelotowo prętów HAS(-U) zainstalowanych prostopadle do osi podłużnej belki; oraz (c) częściowo zamocowanych prętów HZA-P nachylonych względem osi podłużnej belki.

Przykłady rozwiązań w tej branży: Laminaty CFRP w kształcie litery L, śruby przelotowe, instalowane jednej strony wkręty do betonu, instalowane jednej strony kotwy klejone/podcinające.

4.6 Rozwiązania specjalne i kombinacje rozwiązań



Rys. 9: Przykład rozwiązania specjalnego łączącego wklejane zbrojenie na ścinanie z nakładką betonową (nakładka może również pokrywać całą obecną długość)

Gdy obciążenia są wyjątkowo wysokie, można zastosować rozwiązania specjalne lub kombinacje wcześniej wymienionych rozwiązań. Przykładem rozwiązania specjalnego jest laminat z włókna węglowego instalowany przez dwa nachylone otwory i sprężony, w przeciwieństwie do normalnej instalacji bez specjalnie utworzonych otworów.

Rys. 9 przedstawia kolejny przykład, który może znacznie wzmocnić wytrzymałość na ścinanie, łączy wklejane zbrojenie na ścinanie z nakładką betonową. Inne kombinacje, które nie mogą zwiększyć grubości elementu betonowego, mogą łączyć laminaty włókniste z wklejanym zbrojeniem na ścinanie, aby sprostać wymaganiom co do wytrzymałości na zginanie i ścinanie.

5. PRZEGLĄD KWALIFIKACJI WKLEJANEGO ZBROJENIA NA ŚCINANIE

Podczas gdy systemy zbrojenia na ścinanie wbudowane w beton podczas jego wylewania są powszechnie stosowane w branży budowlanej, zastosowanie stalowych elementów *wklejanych* do wzmocnienia elementów betonowych o niedostatecznej wytrzymałości na ścinanie nie jest obecnie objęte żadnym Europejskim dokumentem oceny (EAD) ani zharmonizowaną normą europejską (hEN). Dlatego systemy takie wymagają odpowiedniej kwalifikacji, aby ocenić ich wydajność w projektowaniu i użytkowaniu pod względem wytrzymałości na ścinanie. Przy takich scenariuszach załącznik D do normy EN 1990:2002 [10] zawiera najnowocześniejsze wytyczne kalibracji równania projektowego za pomocą kombinacji testów i modelowania w celu zapewnienia jego zgodności z docelowymi poziomami niezawodności wg normy EN 1990.

Zgodnie z Europejską oceną techniczną (ETA)-20/0541 [11] kombinacja zaprawy epoksydowej HIT-Re 500 V4 i prętów HAS(-U) ze stali węglowej i nierdzewnej z zestawem wypełniającym Hilti jest oceniana i kwalifikowana do użycia jako element mocujący w betonie. Jednak jej zastosowanie jako systemu wzmacniającego instalowanego prostopadle do osi podłużnej elementów betonowych w celu zwiększenia ich wytrzymałości na ścinanie nie było wcześniej badane. Dlatego też niedawno przeprowadzono kompleksowe testy, aby ocenić zachowanie tego nowatorskiego rozwiązania wzmocnienia wytrzymałości na ścinanie i określić wpływ jego głównych parametrów, takich jak: (1) średnica, rozstaw i długość montażowa prętów; (2) głębokość elementu betonowego; oraz (3) wytrzymałość betonu.

Dodatkowe testy sprawdzały solidność systemu w praktycznych scenariuszach, które obejmują niekorzystne warunki instalacji, takie jak, między innymi, mimośrodowość poprzeczna i przypadkowe nachylenie podczas instalowania prętów, a także występowanie pęknięć od ścinania przy obciążeniach eksploatacyjnych. Ten wszechstronny program eksperymentalny umożliwił kalibrację modelu wytrzymałości na ścinanie zgodnego z procedurą oceny niezawodności opisaną w załączniku E do EN 1990, co daje równanie projektowe zgodne z EN 1992-1-1, szczegółowo opisane w następnym rozdziale.

Cały ten program eksperymentalny zrealizowany na Ruhr Universität Bochum (RUB) został oceniony i zweryfikowany pod względem przydatności do stosowania przez instytut DIBt, który przyznał temu systemowi ogólne zezwolenie na stosowanie go jako techniki budowlanej, czyli *aBG Z-15.5-383*, tym samym wypełniając krajowe wymagania dotyczące prac budowlanych z mocy technicznych przepisów budowlanych *MVV TB* lub *Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen*. *MVV TB* służy jako wzór dla Przepisów administracyjnych – Technicznych reguł budowlanych wdrażanych w Niemczech na poziomie federalnym.

6. PROJEKTOWANIE KONSTRUKCJI I ICH DETALI PRZY UŻYCIU PRĘTÓW GWINTOWANYCH HAS / HAS-U

Inne niż zbrojenie wklejane HZA, nowe rozwiązanie Hilti wzmocnienia wytrzymałości na ścinanie obejmuje zaprawę HIT-RE 500 V4 i pręty gwintowane HAS lub HAS-U z zestawem wypełniającym Hilti, nakrętkami i podkładkami. Instalacja tego rozwiązania przypomina instalację kotwy wklejanej, czyli wiercenie na ustaloną głębokość osadzenia prostopadle do powierzchni betonu, czyszczenie otworów z gruzu, a następnie wstrzyknięcie zaprawy i włożenie prętów. Po utwardzeniu zaprawy nakrętki dokręca się momentem obrotowym o ustalonej wartości. Rozwiązanie tu uzyskało krajowe ogólne zezwolenie na stosowanie go jako techniki budowlanej (*abG*) **Z-15.5-383** od instytutu DIBt i wykorzystuje przepisy dla **Projektowanie wspomagane testami zawartymi** zawarte w **Załączniku D do EN 1990**. Rozdział ten zawiera przegląd oceny, projektowania i instalacji wklejanych prętów gwintowanych jako zbrojenia w elementach betonowych o niedostatecznej wytrzymałości na ścinanie.

Przyjęty model wytrzymałościowy jest w pełni zgodny z założeniami projektowymi zawartymi w DIN EN 1992-1-1/NA [12] oraz DIN EN 1992-2/NA [13]. Wymagane weryfikacje przypominają równania (6.8) i (6.9) z DIN EN 1992-1-1/NA, odpowiednio dla wytrzymałości zbrojenia stalowego i maksymalnej wytrzymałości na ściskanie rozpór, przy czym rozdział 4 tego dokumentu obejmuje tło tych równań. Ten model wytrzymałości wykorzystuje również metodę zmiennego nachylenia rozpórki, która pozwala na regulację kąta nachylenia rozpórki ściskanej w celu zrównoważenia sił między rozpórką ściskaną a elementami wzmacniającymi, co może prowadzić do oszczędności projektowania przy zastosowaniu mniej wymaganych prętów.

Bezpośrednie zastosowanie obu równań nie jest jednak możliwe bez modyfikacji wynikających z wyników procedury kwalifikacyjnej i w ogólności weryfikacja ta musi spełniać następujące kryteria dotyczące rozpórek ściskanych i prętów wzmacniających w stanie granicznym dla danej projektowej siły ścinającej, V_{Ed} :

$$V_{Ed} \leq V_{Rd} = \min(V_{Rd,max}, V_{Rd,s}) \quad (12)$$

6.1 Weryfikacja rozpórek ściskanych

Gdy wklejone pręty wzmacniające wytrzymałość na ścinanie instaluje się prostopadle do osi podłużnej elementu betonowego, kąt instalacji wynosi $\alpha = 90^\circ$ a wytrzymałość rozpórki ściskanej zgodnie z równaniem (6.9) z normy DIN EN1992-1-1 w związku z normą DIN EN1992-1-1/NA, *NCI do 6.2.3(1)* wynosi:

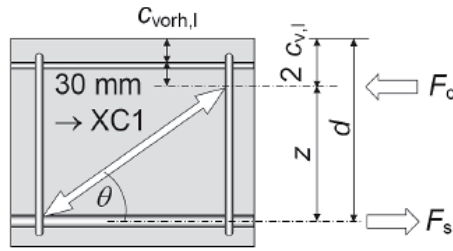
$$V_{Rd,max} = \frac{b_{w,eff} \cdot \alpha_{cw} \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta} \quad (13)$$

Tutaj efektywna szerokość wzmocnionej sekcji $b_{w,eff}$ zastępuje jej całkowitą szerokość, b_w , z parametrem mimośrodowości poprzecznej, e_{inst} , który wzrasta albo do maksimum **50 mm**, albo $b_w/6$ w odniesieniu do środka masy belki, w zależności od położenia zbrojenia podczas instalacji. Należy jednak zauważyć, że mimośrodowość ta **dotyczy tylko jednego rzędu zbrojenia** ponieważ pojedyncze mimośrodowe wiązanie rozciągane w modelu kratownicy indukuje skręcanie elementu konstrukcyjnego proporcjonalne do przyłożonej siły ścinającej. A zatem:

$$b_{w,eff} = b_w - \min\left(50 \text{ mm}, \frac{b_w}{6}\right) \quad (14)$$

Pozostałe parametry w tym równaniu nie różnią się od tych zawartych w normie DIN EN 1992-1-1/NA:

- Ramię dźwigni $z = 0,9d$, z górną granicą $z = \max(d - 2c_{v,l}; d - c_{v,l} - 30 \text{ mm})$. Tutaj efektywna głębokość sekcji do zbrojenia na zginanie wynosi d , a $c_{v,l}$ jest betonowym pokryciem zbrojenia podłużnego w strefie ściskania, przedstawioną na Rys. 10:



Rys. 10: Definicja wewnętrznego ramienia dźwigni, z , odtworzona z Rys. H6-11 [7]

- Ten bezwymiarowy czynnik, $\alpha_{cw} = 1$ uwzględnia stan naprężenia w pasie ściskanym.
- Współczynnik redukcji wytrzymałości dla betonu spękanego skutkiem ścinania, $v_1 = 0.75$
- Obliczeniowa wytrzymałość betonu na ściskanie, $f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} f_{ck}}{\gamma_c}$, gdzie $\alpha_{cc} = 0.85$ i $\gamma_c = 1.5$
- Kąt nachylenia rozpórki ściskanej, θ , musi spełnić warunki określone równaniem (6.7aDE), DIN EN1992-1-1/NA:

Uwaga: Gdy $V_{Ed} \leq V_{Rd,cc}$, wyrażenie

$$\frac{1,2+1,4 \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}}}{1 - V_{Rd,cc}/V_{Ed}}$$

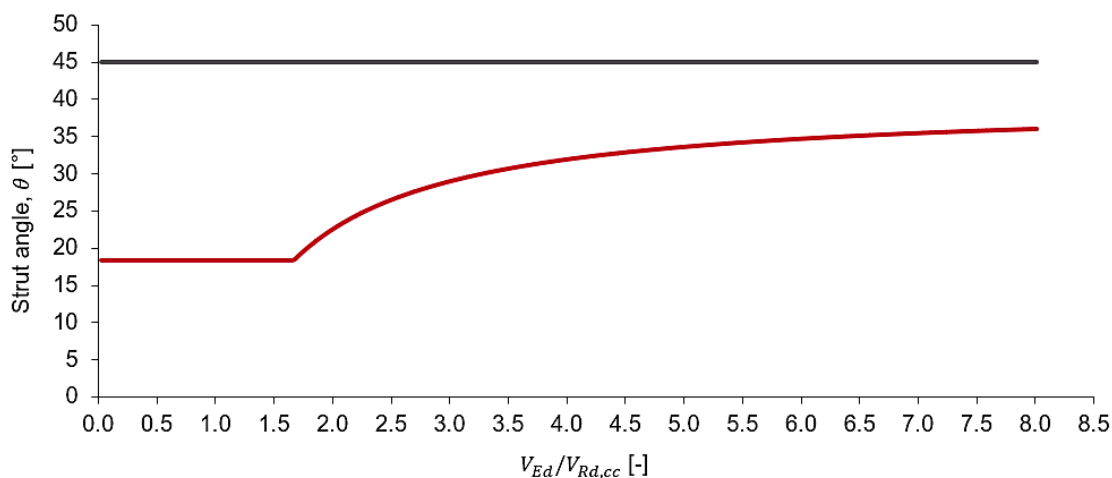
reprezentujące górną granicę $\cot \theta$ przyjmuje wartość ujemną i przekracza ustalone granice górną i dolną; w takich scenariuszach, $\cot \theta = 3.0$.

$$1 \leq \cot \theta \leq \frac{1,2+1,4 \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}}}{1 - V_{Rd,cc}/V_{Ed}} \leq 3,0 \quad (15)$$

- W równaniu (15), $V_{Rd,cc} = 0,5 \cdot 0,48 \cdot f_{ck}^{\frac{1}{3}} \left(1 - 1,2 \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}}\right) \cdot b_{w,eff} \cdot z$, (16)
- Przy projektowaniu wg normy DIN EN1992-2/NA kąt nachylenia rozpórki jest ograniczony przez równanie (6.107aDE):

$$1 \leq \cot \theta \leq \frac{1,2+1,4 \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}}}{1 - V_{Rd,cc}/V_{Ed}} \leq 1,75 \quad (17)$$

Jako $V_{Ed} > V_{Rd,cc}$, wyrażenie to będzie nadal prowadzić do wyniku $\cot \theta > 3,0$, dopóki wystarczająco duża siła ścinająca $V_{Ed} \gg V_{Rd,cc}$ nie zmniejszy $\cot \theta < 3,0$. Ta nowo obliczona górna granica odpowiada maksymalnemu nachyleniu rozpórki ściskanej dla elementów z minimalnym zbrojeniem na ścinanie i odpowiadającą zmniejszoną wytrzymałością rozpórki. Rys. 11 poniżej ilustruje scenariusz, w którym rosnąca siła ścinająca z kolei zwiększa kąt nachylenia rozpórki obliczony z równania (6.7aDE), DIN EN1992-1-1/NA.



Rys. 11: Reprezentatywny związek między stosunkiem $\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,cc}}$ z tym obliczonym kątem nachylenia rozpórki (linia pozioma o wartości 45° przedstawia maksymalny kąt nachylenia rozpórki)

Uwaga: Jest dobrą praktyką nie ignorować tej weryfikacji przy wzmacnianiu istniejących konstrukcji.

Chociaż nie wymagane wyrażnie do weryfikacji wytrzymałości stali lub rozpórki, ścinanie projektowe, V_{Ed} , generuje dodatkową siłę rozciągania, ΔF_{td} , w zbrojeniu podłużnym, która wzrasta, gdy nachylenie rozpórki zmniejsza się zgodnie z EN 1992-1-1, 6.2.3 (7). Siła ta stanowi dodatek do naprężenia wywieranego na zbrojenie podłużne w wyniku zginania, co wymaga oddzielnego sprawdzenia potencjalnego uplastycznienia i uszkodzenia zakotwienia tych prętów. W nowo budowanych konstrukcjach taka weryfikacja ze względu na dodatkowe rozciąganie może nie być wymagana, jeśli maksymalne zgięcie wzdłuż elementu betonowego, $M_{Ed,max}$ astosowano przy projektowaniu zbrojenia i jego zakotwiczenia.

6.2 Weryfikacja rozpórek ściskanych

Przy wklejanych prętach wzmacniających zainstalowanych prostopadłe do osi podłużnej elementu betonowego, kąt instalacji $\alpha = 90^\circ$ a wytrzymałość prętów stalowych wg DIN EN 1992-1-1/NA to:

$$V_{Rd,s} = k_{pi} \cdot k_s \cdot f_{ywd} \cdot a_{sw} \cdot z \cdot \cot \theta \quad (18)$$

Podczas gdy parametry ramienia dźwigni, z , oraz kąt nachylenia rozpórki, θ , nie zmieniają się od weryfikacji rozpórki ściskanej, wartość dla f_{ywd} wynika z oceny i wynosi 390 MPa zarówno dla prętów ze stali nierdzewnej A4, jak i ze stali węglowej 8.8. Obszar naprężeń we wklejanych prętach zbrojeniowych, a_{sw} , na jednostkę długości elementu betonowego łączy liczbę rzędów prętów w kierunku poprzecznym, n_{swt} , rozstaw w kierunku wzdłużnym, s_{wt} oraz obszary naprężeń przekroju poprzecznego poszczególnych prętów, A_{sw} , podane poniżej w:

$$a_{sw} = \frac{n_{swt} \cdot A_{sw}}{s_{wt}} \quad (19)$$

Materiał	Rozmiar pręta	Wartość obliczeniowa granicy plastyczności f_{ywd} [MPa]	Obszar naprężeń przekroju poprzecznego pręta gwintowanego A_{sw} [mm ²]
HAS 8.8, HAS-U 8.8, HAS A4, HAS-U A4	M12	390	84,3
	M16		157
	M20		245
	M24		353

Tab. 1: Parametry geometryczne i materiałowe do zastosowania w równaniach (18) i (19)

Wyrażenie to wprowadza dwa nowe parametry wyprowadzone z oceny:

- Współczynnik zależny od rozmiaru, k_s , jako funkcję ramienia dźwigni, z (w metrach), dla grubości elementów, h , w zakresie 200–2200 mm, przy większym ramieniu dźwigni zmniejszającym ten współczynnik o:

$$k_s = \begin{cases} 1,0 & \text{gdy } z \leq 0,75m \\ 1,15 - 0,20 \cdot z & \text{gdy } z > 0,75m \end{cases} \quad (20)$$

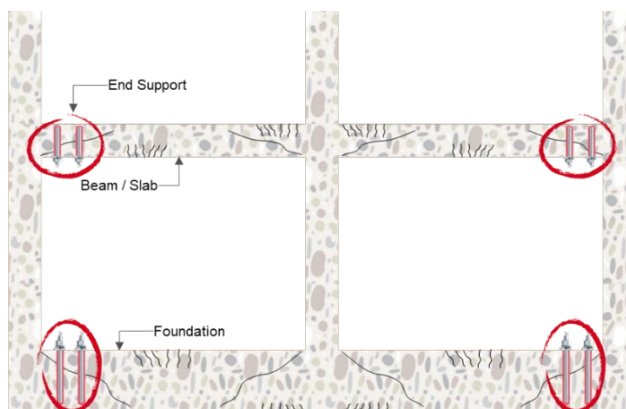
- Współczynnik ten dla wzmocnienia wklejanego, k_{pi} , o stałej wartości łączącej:
 - Statystycznie uzyskany współczynnik **niezawodności**, który porównuje pręty wzmacniające do zbrojenia wbetonowanego,
 - Współczynnik trwałości uwzględniający długotrwałe oddziaływanie na siłę wiązania zaprawy,
 - Współczynnik wrażliwości i tolerancji instalacji,
 - Czynniki uwzględniający obecność pęknięć od zginania i ścinania w strefie kotwienia prętów w stosunku do kierunku instalacji. Jak pokazano poniżej, współczynnik ten jest taki sam dla prętów wszystkich rozmiarów.

Pręty Hilti zwiększające wytrzymałość na ścinanie	Rozmiar pręta	Instalacja jednostronna (Konfiguracja A)	Instalacja jednostronna (Konfiguracja B)
Współczynnik dla wklejanego wzmocnienia wytrzymałości na ścinanie, k_{pi}	M12	0,735	0,588
	M16		
	M20		
	M24		

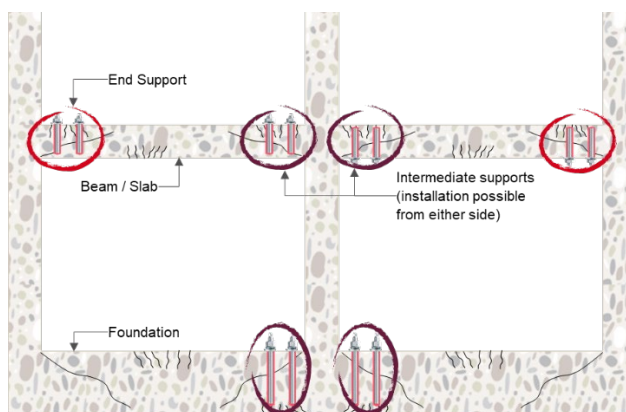
Tab. 2: Parametr wydajności k_{pi} stosowany przy weryfikacji prętów wzmacniających

Chociaż system wzmacniający można instalować zarówno od strony rozciąganej, jak i ściskanej elementu betonowego, na jego skuteczność wpływają dwa czynniki: (1) obecność pęknięć od zginania lub naprężeń osiowych wokół końcówek prętów wzmacniających; oraz (2) możliwość przejścia pęknięć od ścinania poniżej ich końców. Pierwszy czynnik zmniejsza skuteczność systemu, gdy pręty instaluje się z dowolnej strony w obecności pęknięć od zginania, natomiast drugi czynnik może zmniejszyć skuteczność tylko w przypadku instalacji od strony ściskanej.

Pokazana na Rys. 12 i Rys. 13 **Konfiguracja A** przedstawia stan, gdy pręty są instalowane od strony rozciąganej elementu betonowego i przechodzą swobodnie przez pęknięcia od ścinania, ale nie są narażone na pęknięcia od zginania, które są powszechne w warunkach swobodnego podparcia. Scenariusz **Konfiguracji B** z kolei powstaje, gdy pręty instaluje się od strony ściskanej swobodnie podpartego elementu betonowego lub po jednej ze stron sztywno podpartego elementu, narażonego na duże momenty ujemne (hogging) i dużą siłę ścinającą.



Rys. 12: Konfiguracja A, gdzie pręty instaluje się od strony rozciąganej elementu bez oddziaływania pęknięć od zginania

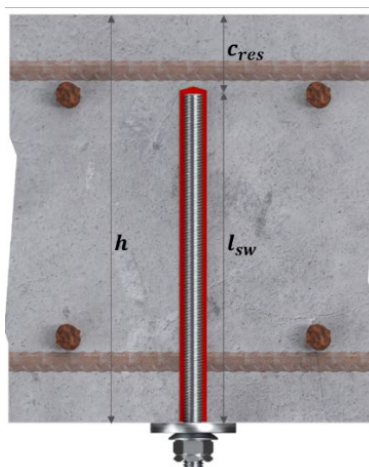


Rys. 13: Konfiguracja B, gdzie pręty instaluje się od strony ściskanej elementu lub instaluje się po stronie rozciąganej lub ściskanej, a pęknięcia od zginania rozwijają się razem z pęknięciami od ścinania

6.3 Wymagania dotyczące projektowania szczegółowego zbrojenia wzmacniającego

Długość instalacji, l_{sw}

Jak wynika z równań (14) i (19) dla wklejanego wzmocnienia wytrzymałości na ścinanie, model projektowy nie wymaga bezpośredniego uwzględnienia długości instalacji, l_{sw} , w tych weryfikacjach, ponieważ jest to funkcja wysokości sekcji, h , i otulina „reszkowa”, c_{res} , zob. Rys. 14. Z punktu widzenia instalacji otulina reszkowa zapobiega wydmuchiowaniu lub odpryskom betonu na powierzchni przeciwnej do wiercenia i nie wymaga znajomości położenia zbrojenia podłużnego blisko tej powierzchni.



Rys. 14: Uproszczony schemat instalacji z [14]

Z punktu widzenia projektowania stała długość instalacji zapewnia, że zbrojenie na ścinanie jest zakotwione w pasie ściskanym elementu, co umożliwia utworzenie modelu kratownicy. Jak wspomniano wcześniej w rozdziale 2 tego dokumentu, model kratownicy, na którym opiera się projektowanie wytrzymałości na ścinanie, zakłada, że zbrojenie na ścinanie obejmuje pas ściskany lub zahacza się wokół niego jako ściąg rozciągany, co umożliwia przenoszenie sił w węzle. W tym celu połączenie zbrojenia wzmacniającego o dużej średnicy, takiego jak pręty M24, z cieńszymi płytami, powiedzmy 200 mm, może skutkować potencjalnie niebezpiecznymi scenariuszami, w których przy pozostałej warstwie otuliny, c_{res} , o grubości 60 mm pozostaje długość instalacji, l_{sw} , zaledwie 140 mm, co nie wystarcza do skutecznego kotwienia mechanizmu rozporowo-ściągowego w węzłach. Dlatego też takie kombinacje nie są dozwolone i wymagana jest korelacja pomiędzy wysokością sekcji a średnicą zbrojenia zgodnie z zależnością w Tab. 3 [14].

	Średnica zbrojenia wzmacniającego			
	M12	M16	M20	M24
Minimalna wysokość sekcji, h_{min} [mm]	200	400	600	
c_{res} [mm]	35	40	45	60

Tab. 3: Korelacja pomiędzy minimalną wysokością sekcji, otuliną resztkową i średnicą zbrojenia wzmacniającego, z Tabeli 3 z [14]

Rozstaw, s_{wl}

Poza warunkiem równomiernego rozprowadzenia kruszywa w betonie podczas odlewania, norma DIN EN 1992-1-1/Na nie definiuje minimalnego rozstawu elementów zbrojenia na ścinania, takich jak strzemiona. Bez wyjątków przy zbrojeniu wklejanym trzeba zachować określony minimalnego rozstawu, aby uniknąć rozszczepienia prętów i potencjalnego zmniejszenia ogólnej wytrzymałości na ścinanie. W Tab. 4 poniżej podano minima w kierunku wzdłużnym i poprzecznym.

Średnica zbrojenia wzmacniającego	Minimalne odstępy podłużne, $s_{wl,max}$ [mm]	Minimalny odstęp poprzeczny, $s_{wl,min}$ [mm]
M12	120	120
M16	160	160
M20	200	200
M24	240	240

Tab. 4: Minimalny rozstaw od środka do środka poszczególnych elementów wzmacniających odtworzony z Tabeli 11 z [14]

Jak widać w Tab. 5 i Tab. 6, maksymalne odstępów w kierunku wzdłużnym i poprzecznym są zgodne z postanowieniami normy DIN EN 1992-1-1/NA, *Tabele NA.9.1 i NA.9.2* dla elementów liniowych oraz *NCI do 9.3.2 (4)* dla elementów płaskich, przy zastosowaniu $V_{Rd,max}$ równania (1) bez modyfikacji.

Stosunek siły ścinającej do wytrzymałości rozprórki	Maksymalne odstępów podłużne, $s_{wl,max}$ [mm]	Minimalne odstępów poprzeczne, $s_{wt,max}$ [mm]
$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} \leq 0,3$	min (0,7 h, 300 mm)	min (h, 800 mm)
$0,3 < \frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} \leq 0,6$	min (0,5 h, 300 mm)	min (h, 600 mm)
$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} > 0,6$	min (0,25 h, 200 mm)	

Tab. 5: Maksymalne odstępów od środka do środka elementów liniowych (np. belek), odtworzony z Tabel NA.9.1 i NA.9.2 z [12]

Stosunek siły ścinającej do wytrzymałości rozprórki	Maksymalne odstępów podłużne, $s_{wl,max}$ [mm]	Maksymalne odstępów poprzeczne, $s_{wt,max}$ [mm]
$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} \leq 0,3$	0.7h	h
$0,3 < \frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} \leq 0,6$	0.5h	
$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} > 0,6$	0.25h	

Tab. 6: Maksymalne odstępów od środka do środka w elementach płaskich (np. płytach), odtworzone z NCI do 9.3.2 (4) z [12]

Odległość od krawędzi, c_{wt}

Ustawienie minimalnej odległości między położeniem prętów wzmacniających a każdą betonową krawędzią zmniejsza ryzyko rozłupania, przy czym minimum to oszacowano w ocenie zaprawy ETA 20/0541 [11]. Minimum podstawowe jest zwiększone o procent długości instalacji, który odpowiada za maksymalne dozwolone nachylenie otworu (5°) prostopadłe do powierzchni betonu. Choć nie określono tego w normie DIN EN 1992-1-1/NA [12] w przypadku tradycyjnego zbrojenia na ścinanie, takiego jak strzemiona, również trzeba zachować maksymalną odległość od krawędzi wklejanych prętów wzmacniających, aby wygenerować co najmniej jeden lub więcej rzędów elementów wzmacniających w szerszych sekcjach ($b_w \geq 350\text{mm}$), zob. Tab. 7.

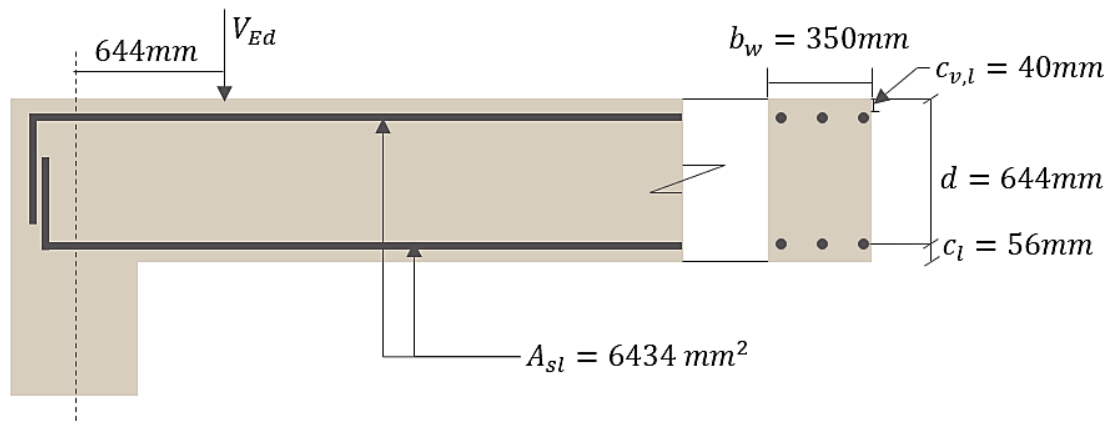
System wiercenia	Rozmiar pręta	Minimalna odległość od krawędzi, $c_{wt,min}$ [mm]		Maksymalna odległość od krawędzi, $c_{wt,max}$ [mm]	
		Bez komponentów pomocniczych do wiercenia	Z komponentami pomocniczymi do wiercenia	Elementy liniowe	Elementy płaskie
Wiercenie udarowe wiertłem rurowym Hilti lub bez niego	M12	$45\text{ mm} + 0,06l_{sw}$	$45\text{ mm} + 0,02l_{sw}$	175 mm	maks. (175 mm, 0,5h)
	M16	$50\text{ mm} + 0,06l_{sw}$	$50\text{ mm} + 0,02l_{sw}$		
	M20	$55\text{ mm} + 0,06l_{sw}$	$55\text{ mm} + 0,02l_{sw}$	250 mm	maks. (250 mm, 0,5h)
	M24	$60\text{ mm} + 0,06l_{sw}$	$60\text{ mm} + 0,02l_{sw}$		
Wiercenie pneumatyczne	M12	$50\text{ mm} + 0,08l_{sw}$	$50\text{ mm} + 0,02l_{sw}$	175 mm	maks. (175 mm, 0,5h)
	M16				
	M20	$55\text{ mm} + 0,08l_{sw}$	$55\text{ mm} + 0,02l_{sw}$	250 mm	maks. (250 mm, 0,5h)
	M24	$60\text{ mm} + 0,08l_{sw}$	$60\text{ mm} + 0,02l_{sw}$		

Tab. 7: Minimalne i maksymalne odległości od krawędzi w odniesieniu do metod wiercenia i tolerancji, odtworzone z Tabeli 14 z [14]

Uwaga: O ile nie zostanie to wyraźnie uwzględnione w projekcie, należy wszędzie, gdzie to możliwe, unikać przewiercania i przecinania zbrojenia na zginanie, aby zapobiec niekorzystnemu oddziaływaniu na konstrukcję. Jeśli nie można tego uniknąć, na przykład w celu ułatwienia wiercenia w gęsto zbrojonych obszarach, wymagane są dodatkowe środki za wyraźną zgodą inżyniera odpowiedzialnego za projektowanie, aby skompensować straty w zbrojeniu na zginanie.

7. PRZYKŁAD PROJEKTU

Istniejąca belka swobodnie podparta o przekroju poprzecznym 350 mm x 700 mm klasy C30/37 ma rozpiętość 8,0 m i jest obciążona równomiernie rozłożonym obciążeniem o wartości 142 kN/m w stanie granicznym nośności. Odstęp od powierzchni betonu górnego i dolnego zbrojenia podłużnego wynosi 40 mm, przy zbrojeniu stalowym w przekroju poprzecznym elementu konstrukcyjnego $A_{sl} = 6434 \text{ mm}^2$ 8H32. Wytrzymałość istniejącego elementu jest weryfikowana zgodnie z normą DIN EN1992-1-1/NA i wzmacniana zgodnie z *aBG Z-15.5-383*.



Całkowite obciążenie maksymalne belki,

$$w = 142 \cdot 8.0 = 1136 \text{ kN}$$

Reakcja podpory,

$$R = \frac{1136}{2} = 568 \text{ kN}$$

6.2.1 (8) [8]

Ścinanie w odległości d od podpory,

$$V_{Ed} = 568 - (142 \cdot 0.644) = 477 \text{ kN}$$

6.2.1 (5) [8]

Weryfikacja istniejącej sekcji,

$$V_{Rd,c} \geq V_{Ed}$$

Równanie 3.15 [12]

Obliczeniowa wytrzymałość betonu na ściskanie,

$$f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{0.85 \cdot 30}{1.5} = 17 \text{ MPa}$$

Równanie 6.2.a [8]

Wytrzymałość na ścinanie istniejącej sekcji,

$$V_{Rd,c} = \left[C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{\frac{1}{3}} + k_1 \sigma_{cp} \right] b_w d \geq V_{Rd,c,min}$$

6.2.2 (1) [8]

Stosunek zbrojenia podłużnego,

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w d} = \frac{6434}{350 \cdot 644} = 0.0285 \geq 0.02$$

6.2.2 (1) [8]

Współczynnik zależny od wysokości elementu,

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{644}} = 1.557 \leq 2.0$$

NDP Zu 6.2.2 (1) [12]

Minimalne obliczeniowe naprężenie ścinające (z interpolacją $600 \text{ mm} < d \leq 800 \text{ mm}$),

$$v_{min} = \begin{cases} \frac{0.0525}{\gamma_c} k^{3/2} f_{ck}^{1/2} & \text{if } d \leq 600 \text{ mm} \\ \frac{0.0375}{\gamma_c} k^{3/2} f_{ck}^{1/2} & \text{if } d > 800 \text{ mm} \end{cases} = \frac{0.0492}{1.5} \cdot (1.557)^{\frac{3}{2}} \cdot (30)^{\frac{1}{2}} = 0.349 \text{ N/mm}^2$$

Minimalna obliczeniowa wytrzymałość na ścinanie, $V_{Rd,c,min} = v_{min} b_w d = 0.349 \cdot 350 \cdot 644 = 78.7 \text{ kN}$

Równanie 6.2.a [8]

liczeniowa wytrzymałość na ścinanie,

$$V_{Rd,c} = \left[0.1 \cdot 1.557 \cdot (100 \cdot 0.02 \cdot 30)^{\frac{1}{3}} \right] 350 \cdot 644 = 137.4 \text{ kN}$$

6.2.1 (5) [8]

Weryfikacja sekcji wzmocnionej, wymagane wzmocnienie!

$$V_{Rd} = \min(V_{Rd,s}; V_{Rd,max}) \geq V_{Ed}$$

NCI Zu 6.2.3 (1) [12]

Ramię dźwigni,

$$z = \min(0.9 \cdot 644; \max(644 - 2 \cdot 40; 644 - 40 - 30)) = 574 \text{ mm}$$

NDP Zu 6.2.3 (2) [12]

Kąt nachylenia rozpórki jest określony przez:

$$1.0 \leq \cot \theta \leq \frac{1.2 + 1.4 \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}}}{1 - \frac{V_{Rd,cc}}{V_{Ed}}} \leq 3.0$$

Równanie 6.7bDE [12]

$$\text{Gdzie } V_{Rd,cc} = 0.5 \cdot 0.48 \cdot f_{ck}^{\frac{1}{3}} \left(1 - 1.2 \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}}\right) \cdot b_{w,eff} \cdot z = 0.5 \cdot 0.48 \cdot \sqrt[3]{30} \cdot 350 \cdot 574 = 149.8 \text{ kN}$$

$$\text{Zatem minimalny kąt nachylenia rozpórki, projektowania) } \theta = \cot^{-1} \left(\frac{1.2}{1 - 149.8/477} \right) = 29.75^\circ$$

(użyć $\theta = 30^\circ$ do)

Równanie 2.1 [14]

$$\text{Wytrzymałość rozpórki ściskanej, } V_{Rd,max} = \frac{1 \cdot 350 \cdot 574 \cdot 0.75 \cdot 17}{\cot(30) + \tan(30)} = 1109.2 \text{ kN}$$

Równanie 6.17 [8]

$$\text{Dodatkowa siła rozciągająca od ścinania, } \Delta F_{td} = 0.5 \cdot 477 \cdot \cot(30) = 413.1 \text{ kN}$$

Przy założeniu instalacji **dwóch** rzędów prętów M16 ($A_{sw} = 157 \text{ mm}^2$) o rozstawie środków **185 mm** wzdłuż długości belki od strony rozciąganej, $k_{pi} = 0.735$, obszar naprężeń wklejanych prętów wzmocniających na metr długości:

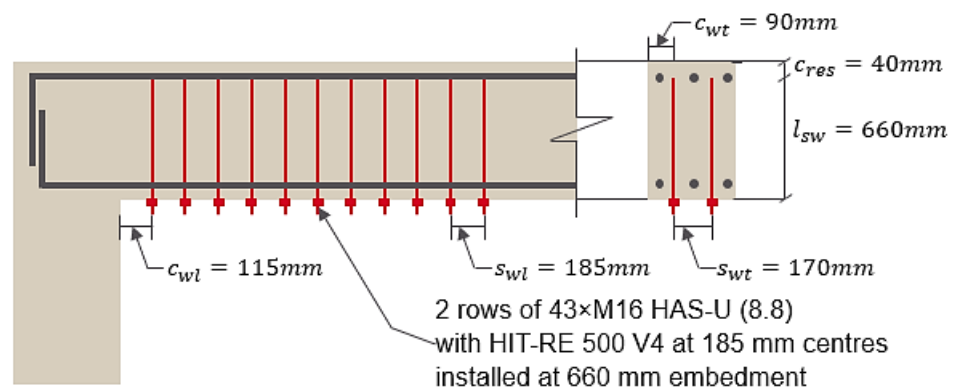
2.2.3 [14]

$$a_{sw} = \frac{n_{swt} \cdot A_{sw}}{s_{wl}} = \frac{2 \cdot 157}{185} \cdot 10^3 = 1697.3 \text{ mm}^2/\text{m}$$

Równanie 2.3 [14]

Obliczeniowa wytrzymałość z wklejonego zbrojenia na ścinanie:

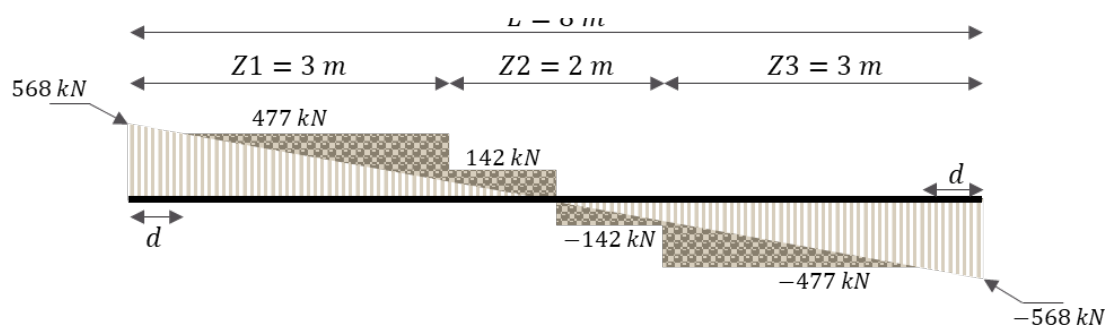
$$V_{Rd,s} = k_{pi} \cdot k_s \cdot f_{ywd} \cdot a_{sw} \cdot z \cdot \cot \theta = 0.735 \cdot 1 \cdot 390 \cdot 1.6973 \cdot 574 \cdot \cot(30) = 483.7 \text{ kN} > 477 \text{ kN}$$

 $\therefore V_{Rd} > V_{Ed}$, zgodnie z projektem!


Specyfikacja: Zainstalować 2 rzędy 43xM16 HAS-U 8.8 z HIT-RE 500 V4 z odstępem między środkami 185 mm wzdłuż długości belki na zamocowaniu 660 mm, z rzędami o odstępie 170 mm.

Dźwignie do optymalizacji

Przy równomiernie rozłożonym obciążeniu zastosowanym w powyższym przykładzie, siła ścinająca, V_{Ed} , zmniejsza się w środkowej części elementu konstrukcyjnego, efektywnie dzieląc belkę na trzy strefy. W Tab. 8 zestawiono wyniki tej samej procedury obliczeniowej dla powyższego przykładu, ale przy skokowym ścinaniu o wykresie pokazanym na Rys. 15, który przedstawia **zmniejszenie** ogólnej liczby wymaganych elementów z **86 do 71**.


Rys. 15: Wykres skokowej siły ścinającej po podzieleniu belki na trzy strefy (strefa 2 jest strefą wspólną dla $V_{Ed} = \pm 142 \text{ kN}$)

Strefa	n_{wt} [-]	s_{wl} [mm]	θ [°]	a_{sw} [mm ² /m]	$V_{Rd,max}$ [kN]	$V_{Rd,s}$ [kN]	Elementy/ strefa wzmacniające
Z1	2	185	30	1697	1109,2	483,7	32
Z2	1	$s_{wl,max} = 300$	30	523	1109,2	149,1	7
Z3	2	185	30	1697	1109,2	483,7	32

Tab. 8: Podsumowanie projektu z trzema strefami (maksymalny odstęp w Strefie 2 nie przekracza ograniczeń określonych w [12]).

8. PRZEGLĄD MODUŁU PROFIS ENGINEERING DO WZMOCNIENIA WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCINANIE

Podobnie jak w przypadku projektowania zbrojenia na ścinanie takiego jak strzemiona wbetonowane w elementy betonowe, ręczne znalezienie optymalnego rozwiązania wzmacniającego dla nich może być zadaniem bardzo powtarzalnym i czasochłonnym z wieloma różnymi wyborami średnic, rozstawu i pozycjonowania. **Oparte na technologii chmury oprogramowanie do projektowania** PROFIS Engineering firmy Hilti zawiera **specjalny moduł** do oceny i wzmacniania elementów betonowych o niedostatecznej wytrzymałości na ścinanie, który pomaga inżynierom budowlanym przy ocenie wytrzymałości istniejących elementów i ich wzmacnianiu, zapewniając w ten sposób bezpieczniejszy i bardziej wydajny przebieg pracy. Oto niektóre podstawowe zalety korzystania z modułu PROFIS Engineering do wzmacniania wytrzymałości na ścinanie:

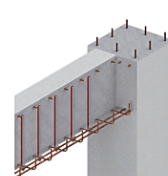
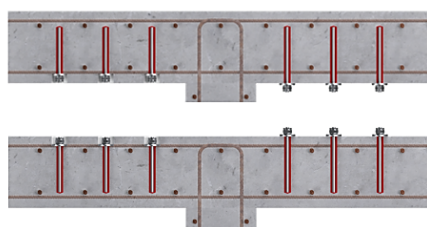
- Wybór odpowiedniego liniowego i płaskiego elementu betonowego.
- Definiowanie typu istniejącego elementu betonowego, geometrii i parametrów materiałowych w celu sprawdzenia potrzeby wzmocnienia pod nową siłą ścinającą.
- Podział elementu betonowego na różne strefy w celu umożliwienia wprowadzenia obciążeń zgodnie z wykresem skokowej siły ścinającej.
- Definiowanie średnicy zbrojenia wzmacniającego, jego rozstawu i optymalnego kąta nachylenia rozpórek ściskanych.
- PROFIS Engineering generuje układ i oblicza całkowite wymagane elementy wzmocnienia na podstawie wcześniej zdefiniowanych danych wejściowych.
- PROFIS Engineering wyświetla współczynniki wykorzystania do weryfikacji istniejącego betonu, wytrzymałości stali w zbrojeniu wzmacniającym wytrzymałość na ścinanie oraz maksymalną wytrzymałość rozpórek ściskanych.
- W celu dokumentacji PROFIS Engineering tworzy kompleksowy raport z projektowania zawierający etapy obliczeń i dostarcza informacji niezbędnych do szczegółowego projektowania zbrojenia.

9. ROZWIĄZANIA HILTI DO WZMACNIANIA WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCINANIE

Poniżej zestawiono nowe rozwiązania Hilti do wzmocniania wytrzymałości na ścinanie dopuszczone zezwoleniem **DIBt aBG Z15.5-383**.

Zaprawa HIT-RE 500 V4 + następujące zbrojenie wmacniające:

- Pręty HAS(-U) A4: M12, M16, M20 i M24
- Pręty HAS(-U) 8.8: M12, M16, M20 i M24
- Zestaw wypełniający Hilti (8.8 i A4): M12, M16, M20 i M24



Design Software:

PROFIS Engineering Suite



Installation tools:

- Injection dispenser



- Automated torque



Mortar:

- HIT-RE 500 V4



Steel elements:

- HAS (cut or meter) & HAS-U both in A4 & 8.8 with filling set

Installation tools:

- Drill machine
- Hammer drill bit
- Hollow drill bit
- Setting tool



10. PODSUMOWANIE

Przekształcanie i ponowne wykorzystanie starszych konstrukcji może zapewnić wiele korzyści w porównaniu z budowaniem konstrukcji nowych, przy czym każda konstrukcja po wzmocnieniu wymaga spełnienia określonych celów. Stosownie do wybranej filozofii projektowania inżynier konstruktor może rozwiązać problem niedostatecznej wytrzymałości na ścinanie liniowych lub płaskich elementów betonowych przy użyciu różnych, mniej lub bardziej inwazyjnych metod. Zastosowanie wklejanego zbrojenia na ścinanie, takiego jak rozwiązanie Hilti z prętami gwintowanymi HAS (-U) i zaprawą HIT-RE 500 V4, jest nowatorskim przykładem mało inwazyjnej metody, która może znacząco zwiększyć wytrzymałość elementu konstrukcyjnego na ścinanie.

Inżynierowie, po odpowiedniej ocenie i uzyskaniu ogólnego pozwolenia instytutu DIBt na zastosowanie tego systemu jako techniki budowlanej (aBG) mogą zastosować znane podejście projektowe oparte na Eurokodzie 2, zintegrowane z pakietem PROFIS Engineering Suite firmy Hilti, aby znaleźć wykonalne rozwiązanie poprzez dobór podstawowych parametrów projektowych, takich jak średnica, odstęp i zmienne nachylenie rozpórki. Dzięki intuicyjnemu interfejsowi nowy moduł Shear Strengthening wzmocnienia wytrzymałości na ścinanie pomaga inżynierom oszczędzając czas na etapie projektowania, przysparzając wartości ich klientom i jednocześnie przyczyniając się do poprawy bezpieczeństwa i odporności budowli.

11. ODNOŚNIKI

- [1] N. Addy, "Making sustainable refurbishment of existing buildings financially viable," in *Sustainable Retrofitting of Commercial Buildings - Cool Climates*, S. Burton, Ed., Abingdon, Routledge, 2015, pp. 57-73.
- [2] fib Task Group 8.1, "fib Bulletin 103 - Guide to Strengthening of Concrete Structures," Fédération internationale du béton (fib), Lausanne, 2022.
- [3] W. Ritter, "Die Bauweise Hennebique," *Schweizerische Bauzeitung*, vol. 17, pp. 41-43, 49-52 und 59-61, 1899.
- [4] ASCE-ACI Committee 445, "Recent approaches to shear design of structural concrete," *Journal of Structural Engineering*, vol. 124, no. 12, pp. 1375-1417, 1998.
- [5] E. Mörsch, *Der Eisenbetonbau – Seine Theorie und Anwendung*, 1 ed., vol. 1, Stuttgart: Verlag Konrad Wittwer, 1922.
- [6] P. Kotes, *Concrete Structures - Part II*, Zilina: University of Zilina, 2008, p. 92.
- [7] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, "Teil 1: Erläuterungen zu DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA (Heft 600)," Beuth, Berlin, 2020.
- [8] EN 1992-1-1:2004: Eurocode 2 - Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, Brussels: CEN, 2004.
- [9] ACI Committee 440, "ACI PRC-440.2-23: Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Stengthening Concrete Structures," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2023.
- [10] CEN, "EN 1990:2002+A1:2005 - Basis of structural Design," CEN, Brussels, 2005.
- [11] Hilti, "ETA-20/0541: Injection system Hilti HIT-RE 500 V4," DIBt, Berlin, 05.05.2023.
- [12] DIN EN 1992-1-1/NA: National Annex – Nationally determined parameters – Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, Berlin: DIN, 2013.
- [13] EN 1992-2:2018: Eurocode 2 - Design of concrete structures - Part 2: Concrete bridges - Design and detailing rules, Brussels: CEN, 2018.
- [14] Deutsches Institut für Bautechnik, "Z-15.5-383 - Hilti Querkraft-Verstärkungssystem mit Hilti HIT-RE 500 V4," DIBt, Berlin, 2024.



Hilti (Poland) Sp. z o.o.
ul. Franciszka Klimczaka 1
02-797 Warszawa
T 22 320 56 00

www.facebook.com/hiltigroup
www.hilti.group