

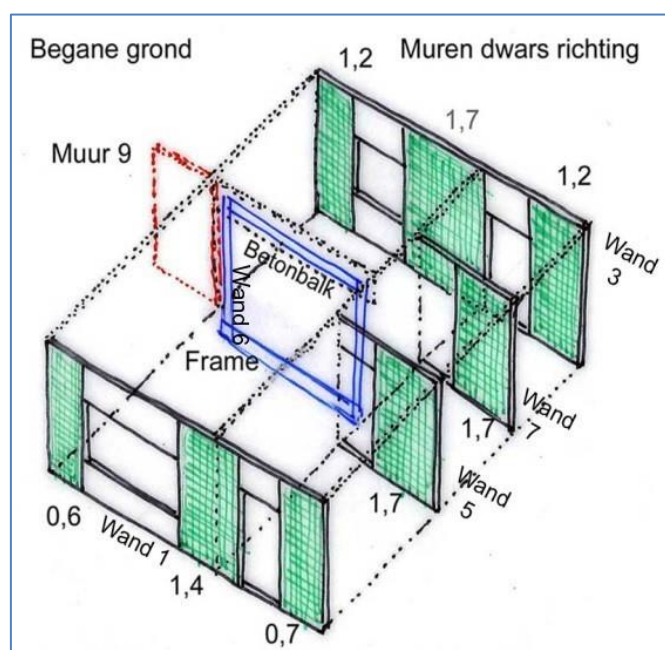
Duurzaam Herstel en Versterking van Woningen in Groningen

Hoofdstuk 6

MUREN VERSTERKING

Belasting loodrecht op het vlak van de muur en in het vlak van de muur.

Na de aardbevingsproblematiek en de afbouw van de aardgasproductie



Abstract: Het verloop en de verdeling van de krachten in de muren wordt uitgelegd en de voor- en nadelen van de verschillende versterkingsmethoden. Verscheidene oplossingen voor portalen en het schadeherstel en (seismische) versterking van ongewapende bakstenen muren in de Groningse woningbouw. Observaties over belastingen loodrecht op het vlak van de muur en in het vlak van de muur, met behoud van het algemene aanzicht van de gevels.

Kernwoorden: aardbevingen, baksteen, belastingen, binnenmuren, diafragma, constructieve glaspanelen, gevels, Groningse woningbouw, lintvoegwapening, muren, muurherstel, muurschijven, portalen, ringbalken, schadepreventie, seismisch versterken, wokkels.



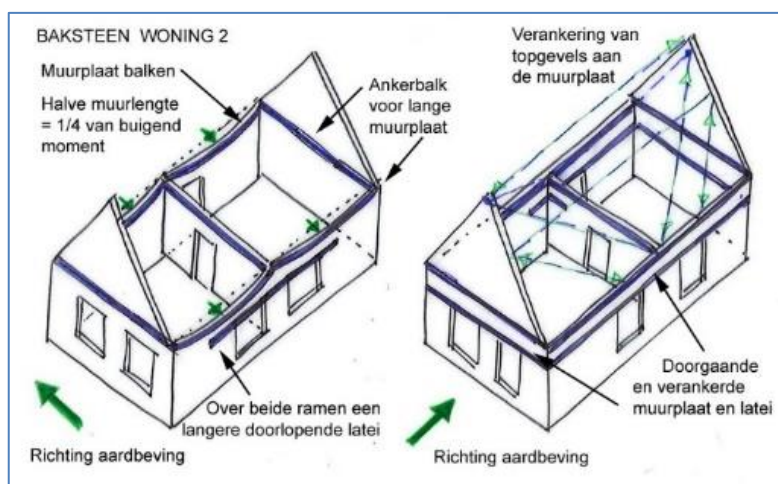
Door: Sjoerd Nienhuys
Bouwkundig, seismisch ingenieur
Juli 2023

Voorwoord

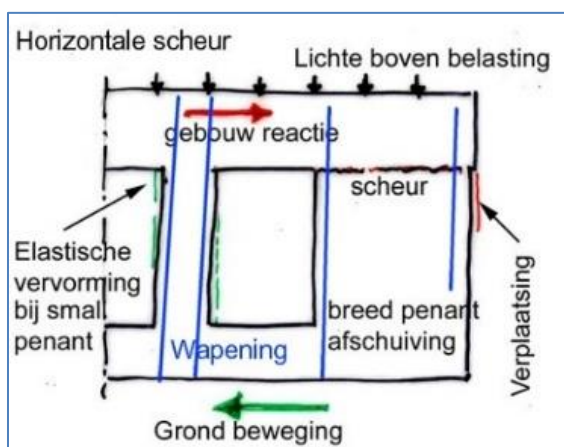
De scheuren in de muren zijn met stip het meest zichtbare effect van de aardbevingen en een duiding van de geringe sterkte van de typisch Nederlandse baksteen woningbouw tegen seismische belastingen. Om beschadigde woningen te herstellen of versterken is het noodzakelijk om alle muren rondom het gebouw te versterken met trekwapening **EN** de etage vloeren te veranderen in goed aan alle muren verbonden en stijve diafragma's. Dit is om te zorgen dat die vloeren de bevingskrachten in het vlak van de zijmuren naar de fundering kunnen overbrengen.

Het blijft noodzakelijk dat de funderingen niet kunnen verzakken door trillingen van aardbevingen of verkeer, ook niet onder de (eventueel) versterkte binnenmuren. Verbreding van funderingen onder binnenmuren is soms wenselijk. (Hoofdstuk 4). Versterken van de muren is geen alternatief voor het versterken van de funderingen.

Figuren 6-1. Elementaire versterkingsmaatregelen voor de Nederlandse bouw. Ringbalken in alle muren, ook de dragende binnenmuren. Daaraan gekoppeld (versterkte) diafragma's. Beneden. De smalle raampenanten moeten versterkt worden met verticale wapening.



Rechts. Als alternatief op penanten versterking kunnen smalle raampenanten technisch verbreed worden door de ramen dicht te metselen of er sterke glaspanelen in aan te brengen.



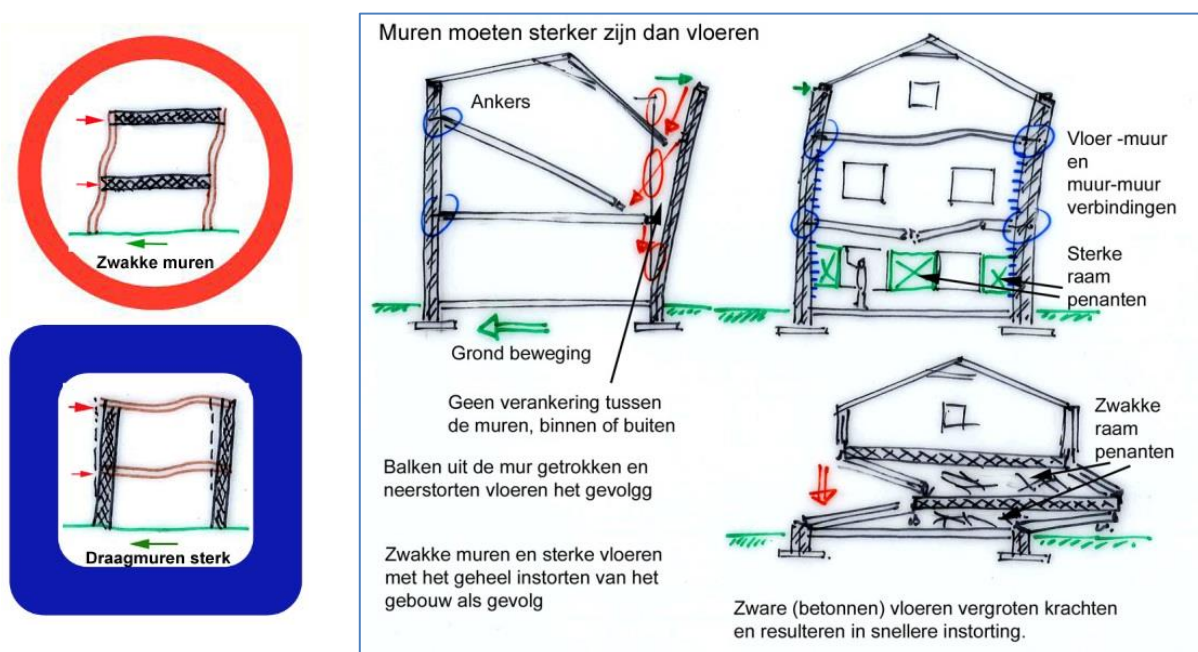
Tenslotte zal naast het technisch/sterkte verduurzamen van de woning ook de woning in algemene zin verduurzaamd moeten worden (onder andere met goede isolatie), iets wat het beste tegelijkertijd gedaan kan worden met de muurversterking om op kosten te besparen.

6.0. Muren en kolommen dragen de constructie

Muren en kolommen dragen het gewicht van het gebouw en brengen de horizontale aardbevingsbelastingen van het dak en de vloeren over op de fundering. Vloeren en balken dragen hun eigen gewicht en de nuttige belasting, maar genereren bij aardbevingen extra horizontale belastingen op de muren langs die vloeren. Stormwind belast via druk en zuiging de buitenschil (gevels en dak) van de woning en die belasting wordt via de muren ook op de funderingen overgebracht. Afhankelijk van de gebouwvorm kan aardbevingsbelasting aanzienlijk groter zijn dan de hoogste stormbelasting.

Bij een aardschok veroorzaakt de horizontale grondversnelling een gebouwbelasting die gerelateerd is aan de massa, hoogte en elasticiteit van het gebouw. Deze aardbevingsbelasting komt boven op de normale belastingen waar de Nederlandse woningbouw traditioneel op is geconstrueerd. Oude bakstenen woningen zijn brosse constructies en vaak niet bestand tegen deze schokken, waardoor er makkelijk scheuren in de muren kunnen ontstaan of bestaande scheuren kunnen verergeren. De verticale trillingen die hierbij voorkomen kunnen ook extra zettingen in de fundering veroorzaken, waarbij een 2 mm fundering zetting ook een scheur in de buitenmuur van 2 mm kan opleveren. Bakstenen muren worden door de scheuren verzwakt, speciaal tegen afschuivingskrachten.

Wanneer een muur of kolom bezwijkt, heeft dat grotere gevolgen in een gebouw dan het bezwijken van een vloer. Het principe van een sterke kolom- of muurconstructie (verticaal) in combinatie met een flexibele balken- en vloerconstructie (horizontaal) is daarom belangrijk in een aardbevingsresistent ontwerp. De Nederlandse steens-muren en halfsteens spouwmuren zijn echter slecht bestand tegen krachten loodrecht op het vlak van de muur. Bij onvoldoende steun of verankering tijdens een horizontale aardbevingsbelasting kunnen ze knikken of omvallen, c.q. instorten, waardoor ook de vloeren naar beneden storten.



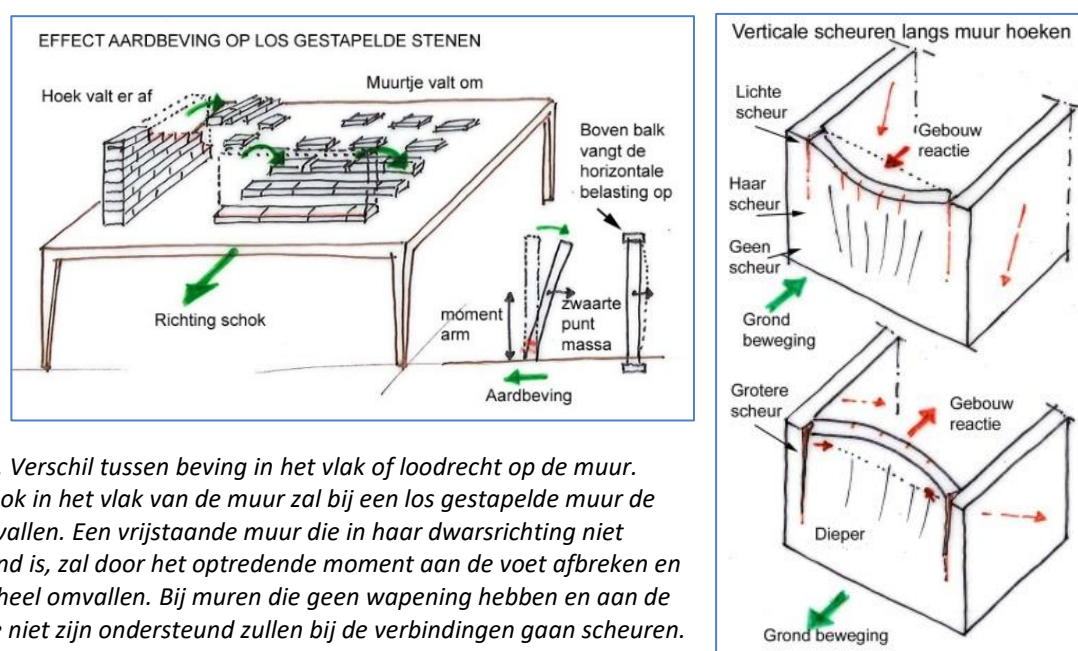
Figuren 6-2. Bij slechte verbindingen aan de vloeren kan de muur naar buiten wegvallen. Bij excentrische belasting kan knik ontstaan. De verbindingpunten van de muren moeten momentsterker zijn dan die van de vloeren. Verbindingen moeten ductiel zijn. Wanneer de kolom of muur bezwijkt, stort het hele gebouw in.

Het versterken van muren is pas zinvol wanneer de funderingen voldoende sterk zijn en voldoende draagkracht hebben zodat geen partiële of plaatselijke verzakkingen kunnen optreden. Ook bij het voor lange termijn technisch verduurzamen van de woning heeft een **goede fundering dus prioriteit**.

Hoewel bij een PGAg < 0,05 de horizontale bevestigingsbelastingen klein zijn¹, zullen oude bakstenen gebouwen op hun constructiedetails beoordeeld moeten worden en zwakke muurdelen versterkt. Door de grote massa en stijfheid van betonnen vloeren in rijtjeswoningen (risico) zal deze categorie extra aandacht moeten krijgen om scheurvorming en verdere schade te voorkomen.

6.1. Voorkom krachten loodrecht op de bakstenen muur

De aardbevingsbewegingen van de grond worden via de gebouwfundering op het bovenstaande gebouw overgebracht. De massa van het gebouw heeft een traagheid waardoor er bij een beving extra spanningen in de constructie optreden. De belastingen moeten weer naar de fundering worden teruggevoerd. Dit kan via sterke binnenmuren, (versterkte) raampenanten, kolomconstructies, portalen of frames en sterke glaspanelen. In de provincie Groningen zijn de meeste gebouwen van het doosmodel. Echter, dat is een doosmodel waar er aan twee zijden meestal geen dragende muren zitten, maar grote (of veel) ramen die geen krachten kunnen opnemen.



Figuur 6-3. Verschil tussen beving in het vlak of loodrecht op de muur. Bij een schok in het vlak van de muur zal bij een los gestapelde muur de hoek eraf vallen. Een vrijstaande muur die in haar dwarsrichting niet ondersteund is, zal door het optredende moment aan de voet afbreken en in haar geheel omvallen. Bij muren die geen wapening hebben en aan de bovenzijde niet zijn ondersteund zullen bij de verbindingen gaan scheuren.



Figuren 6-4. De krachten vanwege de gebouwmassa. Deze moeten via de muren (in het vlak van die muren) naar de fundering worden afgevoerd. Er moet voorkomen worden dat die belastingen loodrecht op de muren komen te staan. Vrijstaande muuronderdelen moeten daarom kort/laag blijven of speciaal versterkt.

¹ Op basis van de sterke vermindering en uiteindelijk stoppen van de aardgas exploitatie van het Groningse aardgasveld zullen de aardschokken vanaf 2020 niet boven de PGAg 0,05 uitkomen.

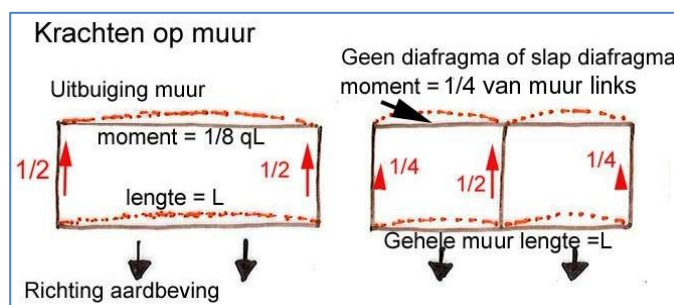
Wanneer de belastingen loodrecht op de muur staan, ondergaat die muur een buigend moment, waar deze in Nederland niet op is ontworpen. Hoe hoger het muurvlak, hoe hoger de belasting aangrijpt en hoe groter het moment, en hoe sneller de muur zal breken en bezwijken. Bij een aardbeving worden de belastingen veroorzaakt door de eigen massa en zijn dus geen externe krachten. Daar bovenop kunnen belastingen komen van andere gebouwonderdelen, bijvoorbeeld van de vloer of het dak.

Indien een woningmuur niet aan de bovenkant wordt ondersteund dan kan deze worden beschouwd als een vlak dat aan **drie** kanten ondersteund is. De belasting loodrecht op het vlak van de muur veroorzaakt doorbuiging- en inklemmingsmomenten die vergelijkbaar zijn met een vlak dat driezijdig is opgelegd. Slechts een gedeelte van de belasting wordt dus direct naar de basis (de onderste van de drie zijden) van de muur afgevoerd en naar de fundering.

Extra horizontale gebouwbelastingen van een vloer of een dak zullen de belasting op de vrije bovenzijde vergroten. Verticale aardbeving trillingen geven een belasting van een schuin dak op de muurplaat. Die muurplaat verdeelt deze belasting in verticale en horizontale belastingen op de vloer (vloerdiagram) en de onderstaande muur.

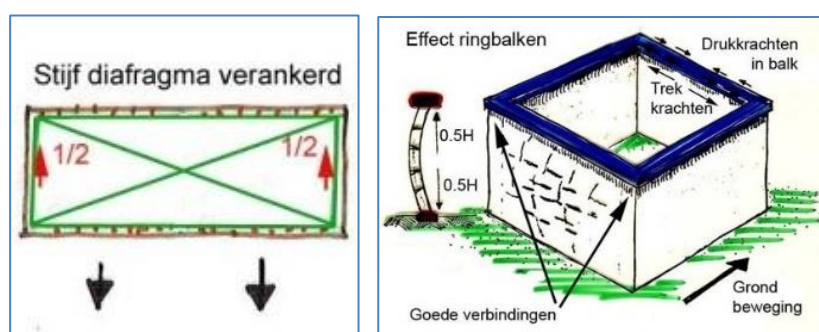
Te grote belastingen op de muren kunnen voorkomen worden door de muurvlakken korter te maken, of ze rondom te ondersteunen door goede verbindingen aan de vloeren (vloerdiagramma's).²

Figuur 6-5. Door de muurlengte te halveren wordt het moment in die muur $\frac{1}{4}$. (Moment = $\frac{1}{8} qL^2$). Deze belastingen moeten niet alleen naar de zijkanten van de muren afgevoerd, maar ook naar onderen en boven, naar de verbindende vloeren.



Door de onder- en bovenkant van de muur goed vast te zetten aan de vloer en zorg te dragen dat het stijve vloerdiagram de krachten naar de zijkanten afvoert, wordt het moment in de muren kleiner.

Figuren 6-6. Vloerdiagramma vermindert de muurbelasting. Door de verbindingen van de muren aan een voerdiagram of ringbalk worden de momenten in de muur kleiner. De belastingen worden nu via de zijmuren in het vlak van die muren naar de fundering overgebracht.

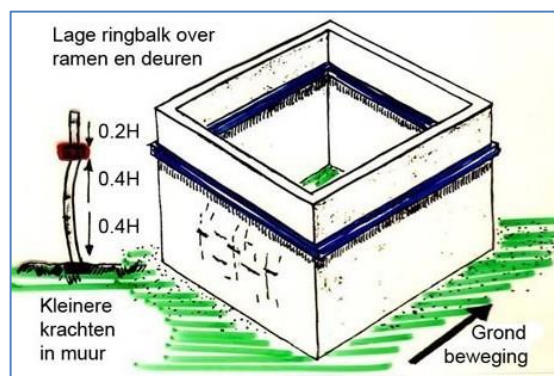


Muren hebben openingen met deuren en ramen met weinig massa. Die openingen veroorzaken weinig belasting, maar tegelijkertijd zijn ze openingen een constructieve verzwakking van die muur (tenzij die kozijnen met constructieve glaspanelen extra sterk zijn gemaakt). Door direct boven en langs die openingen een versterking aan te brengen (doorlopende lateien die samen een trekband boven de ramen creëren) wordt die muur sterker. In de Nederlandse woningbouw lopen de lateien NIET door en hebben dus NIET deze versterkingsfunctie.³

² Het hoofdstuk 8 over vloerdiagramma's gaat dieper in op de technologie van de vloerdiagramma's.

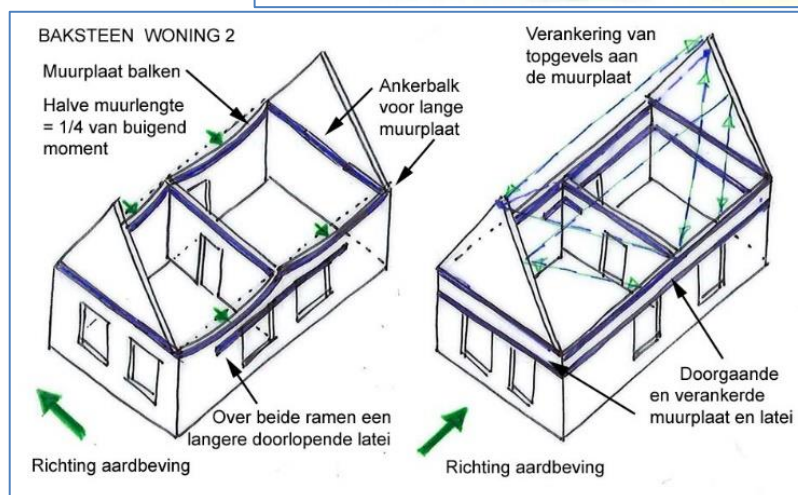
³ In hoofdstuk 7 wordt dieper ingegaan op de problematiek rond lateien.

Figuur 6-7. De ringbalk op het niveau van de raamlateien. De ringbalk verlaagt de vrije muurhoogte en maakt het onderstuk relatief sterker. Door deze lateien ringbalk te verbinden aan gelijke balken in de dwarsmuren, kunnen deze dwarsmuren de krachten naar de fundering afvoeren.



Figuur 6-8. Latei-ringbalken en muurplaten. Door de lateien door te laten lopen en aan dwarsmuren te verbinden zullen de krachten loodrecht op de muren veel minder worden.

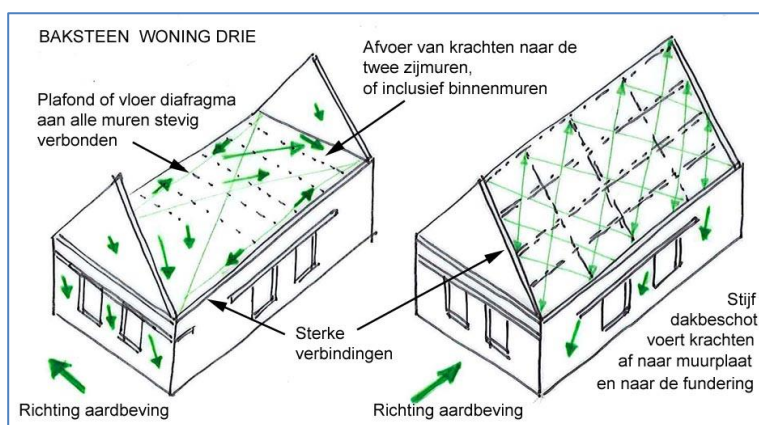
Bij bestaande bouw kan er een doorlopende wapening in de lintvoegen worden aangebracht die over alle lateien loopt en om de hoeken van het gebouw loopt.



Het aanbrengen van een stijf en sterk vloerdiafragma dat goed aan de ringbalken op alle muren is verbonden is altijd aan te bevelen. Door het stijve vlak en de verbinding aan alle onderliggende muren worden de krachten naar de zijmuren afgevoerd. De versterking en verstijving van het diafragma is een effectieve manier om de beweging van de bovenkant van de muren tegen te gaan. De zijmuren onder het diafragma moeten dan wel die krachten in hun vlak overdragen. Ramen en smalle raampenanten zijn daar niet geschikt voor en moeten versterkt worden.

In het vloerdiafragma ontstaan trek en drukzones die de krachten naar de onderliggende of buitenste dwarsmuren afvoeren. Bij slechts twee dwarsmuren, alleen op de uiteinden van het gebouw, ontvangen deze elk de helft van de belasting. Bij één enkele midden-muur zal deze echter de helft van die belastingen opvangen (zie *Figuur 6-5*). Dat betekent ook dat deze midden-muur en diens fundering sterker moet zijn dan die van de buitenmuren aan de zijkanten. In de Nederlandse woningbouw is die binnenmuur vaak halfsteens met een smalle fundering en dus **onvoldoende sterk**.

Figuur 6-9. Het stijve vloerdiafragma brengt de krachten naar de zijmuren. Deze zijmuren worden in het vlak van de muur belast. Hetzelfde principe moet gelden voor een stijf dakbeschoot dat de krachten op de vloer overbrengt of in het vlak van de onderstaande muren.

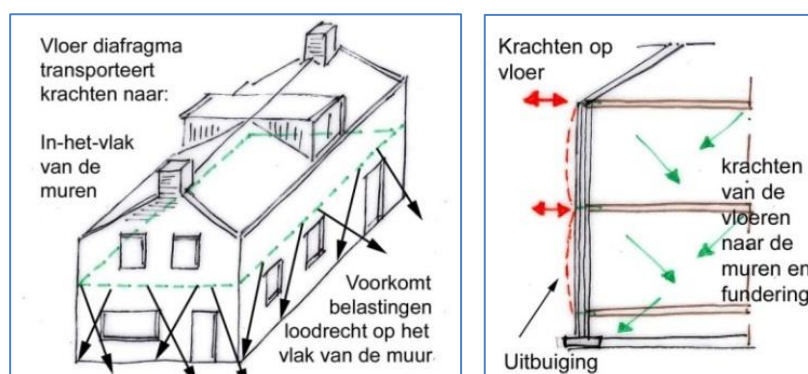


Baksteen metselwerk is een brosse constructie die niet op (trek)spanningen belast kan/mag worden. Ook wanneer de muur nog onbeschadigd is, kan deze slechts weinig buiging tolereren. Met iets te veel doorbuiging van een muur ontstaat een scheur, waarbij dan plotseling alle treksterkte of afschuivingssterkte uit de bakstenen muur is verdwenen.⁴ Eenmaal gebarsten met een aardbeving kan de muur helemaal geen trek meer opnemen, alleen druk.

In oudere bakstenen gebouwen komen veel haarscheurtjes en grotere scheuren voor ten gevolge van zetting van de fundering en andere oorzaken. In de praktijk komt het erop neer dat bij in baksteen gemetselde muren niet gerekend mag worden met enige treksterkte, ook niet als ze gelijmd zijn.

In aardbevingsregio's met een maximale $PGAg > 0,2$ is gewapend metselwerk verplicht en omsluiting van metselwerk door een aardbevingsresistente constructie. De muren moeten ook een minimale dikte hebben ($> 1/15$ hoogte) of speciaal gewapend zijn. Halfsteensmuren van 11 cm bij een kamerhoogte van 240 cm zijn dus al te dun. Met matig of slordig voegwerk is de netto muurdikte dan vaak ook niet meer dan 9 cm.

Figuren 6-10. Krachten moeten naar de fundering. Bij seismisch versterken van een gebouw zullen de krachten loodrecht op het vlak van de muren voorkomen moeten worden en in het vlak van de muren afgevoerd naar de fundering.



Bij de Nederlandse bouw is de spouwmuur een samenstelling van twee halfsteensmuren, die elk 10 tot 11 cm dik zijn. De gebouwbelastingen komen hoofdzakelijk op de binnen spouwbladen, maar de massa belasting van de muren komt ook op de buiten spouwbladen. De twee spouwbladen ondersteunen elkaar met spouwankers (ijzerdraadjes), waardoor de sterkte van deze muren tegen doorbuiging iets toeneemt. Echter, wanneer de spouwankers flexibel zijn, of te weinig in aantal, of verroest zijn, is de muur onvoldoende sterk tegen aardbevingsbelastingen.

6.2. Versterken tegen belasting loodrecht op het vlak van de muur

Om muren te versterken tegen een belasting loodrecht op het vlak van de muur, zijn verschillende opties mogelijk. Het niveau van versterking, ruimte gebruik, de mogelijke verbindingen tussen de versterkte muur en de dwarsmuren en vloeren, de kostenaspecten en eenvoud of robuustheid van de constructie zijn onderdelen van de keuze.

Met het versterken van de muren moet ook de thermische isolatie van de buitenschil opgewaarderd moeten worden naar de 2020 nieuwbouwwaarde van $R_c = 4,7 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$. Bij metalen of houten verstijvingen kan de thermische isolatie tussen en op de profielen geplaatst worden.⁵

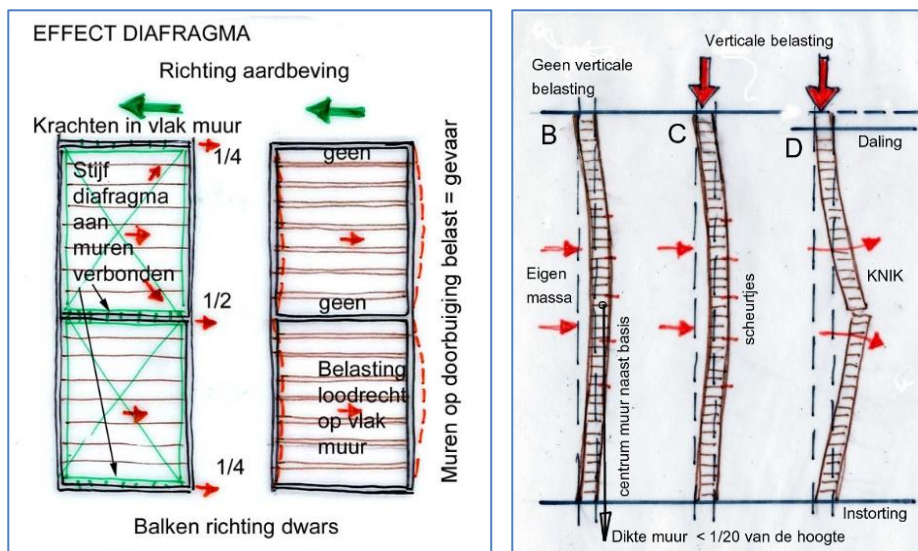
Met een maximale $PGAg < 0,1$ ontstaat een gelijkvormige belasting van ongeveer 10% van de gebouwmassa. De aardschokken zijn sinds 2020 echter niet groter dan $PGAg 0,05$ en insignificant voor steeds binnenmuren, maar wel te groot voor halfsteens dragende binnenmuren. Die dunne binnenmuren moeten met de ontwikkeling van vloerdiafragma's versterkt worden.

⁴ Dit heeft direct een vermindering van de spanningen tot gevolg, maar deze scheuren kunnen of zullen zich verder uitbreiden bij hernieuwde trillingen of aardschokken.

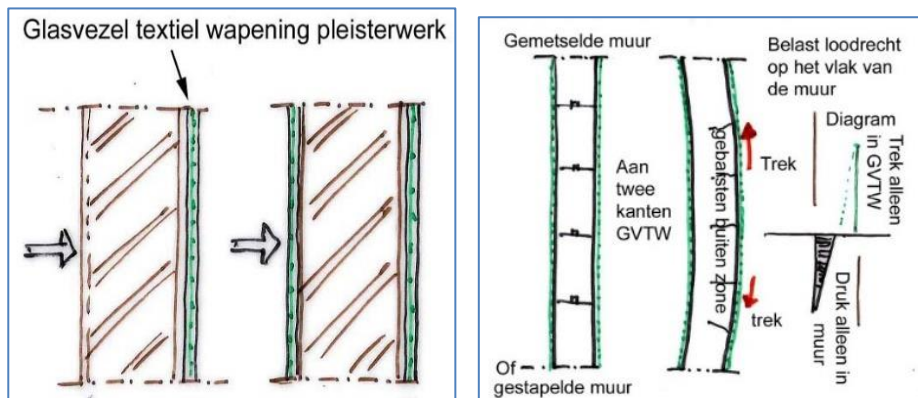
⁵ Zie "Lange Warmtelekken...." document op website www.nienhuys.info eerste pagina.

Het probleem van dunne binnenmuren (dikte $\leq 1/15^{\text{de}}$ hoogte) ontstaat wanneer deze ook dragende muren zijn of worden. Bij het maken van een stijf vloerdiaphragma zal het belastingpatroon van een binnenmuur sterk wijzigen. Bij verankering en verstijving van het plafonddiaphragma kan de belasting op dragende binnenmuren **verdubbelen**. Door de combinatie van de doorbuiging t.g.v. eigen massa met een verticale belasting kan knik en instorting veroorzaken.

Figuren 6-11. Vergroting van de binnenmuur belasting. Door het maken van een stijf diafragma kan een binnenmuur die eerst niet belast was (parallele balken) de helft van de hele vloer belasting krijgen. Bij een combinatie van uitbuiging en topbelasting kan dan knik ontstaan.

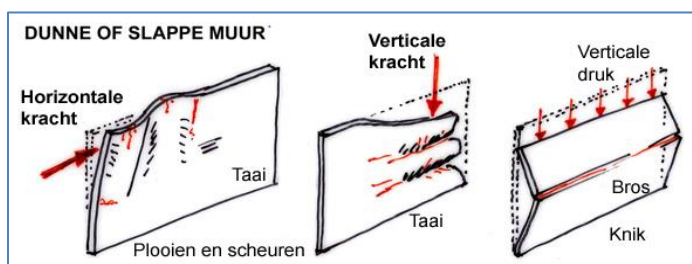


Figuren 6-12. Opties binnenmuur versterking. Een eenvoudige manier om binnenmuren te versterken is de toepassing van Glasvezel Textiel Wapening (GVTW) aan beide zijden, of het lijmen van stroken Carbon Fibre (CRFP).



6.3. Glasvezel textiel muurwapening binnenmuren

Ofschoon voor de eigen muurmassa er zelden versterking nodig is voor niet-dragende dunne muren, is dit wel het geval voor dunne muren die verticale belasting krijgen vanuit de bovenliggende etage, of schuine (afschuif) belasting vanwege de gekoppelde vloerdiagramma's. Dunne of slappe muren kunnen plooiën, barsten en knikken. Tweezijdig opgeplakte glasvezelwapening voorkomt dit.



Figuren 6-13. Vervorming van belaste binnenmuren. Belasting op dunne muren kan makkelijk vervorming van deze muren veroorzaken met scheuren en mogelijk instant bezwijken tot gevolg.



Bij de foto boven rechts, is de horizontale scheur ontstaan door het wegzakken en draaien van de fundering t.g.v. een naastliggende sloot. Een doorzakkende kapconstructie kan het bovengedeelte van een muur naar buiten wegdrücken (bij grote gebintenschuur). Deze voorbeelden geven aan dat een horizontale scheur verschillende oorzaken kan hebben en ook dat een horizontale scheur niet direct het bezwijken van de muur als gevolg hoeft te hebben.



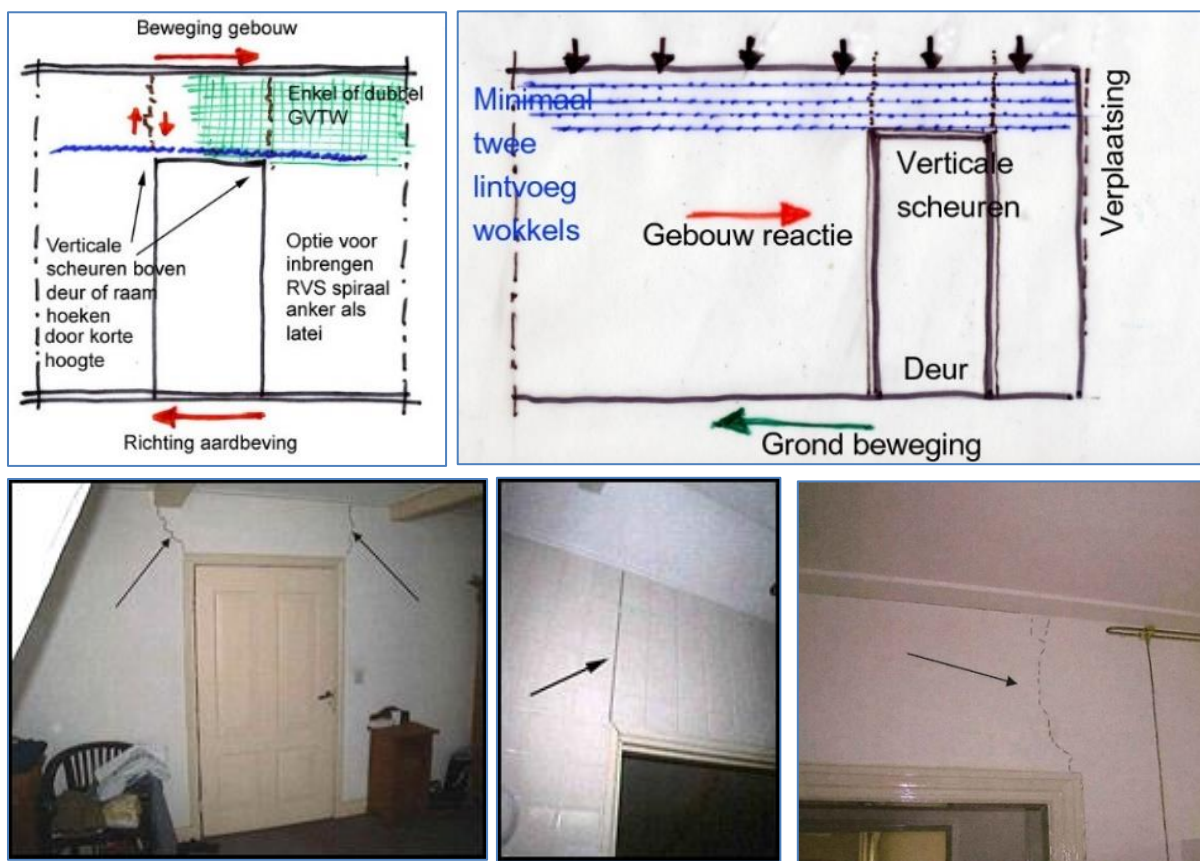
Figuren 6-14. Wapening met Carbonvezel stroken (CRFP) en glasvezelstroken (GVTW). De stroken zijn met epoxy op de muren gelijmd. Glasvezelmatten kunnen met cementmortel/pleister geplakt. Crepi glasvezeldoek wordt ook bij buitenmuurisolatie gebruikt, Polypropyleen banden en glasvezelbehang zijn andere opties. Minischeurtjes worden met het versterkte behang blijvend weggewerkt. Foto's onder.



Het muurgedeelte boven binnendeuren is te kort en zwak om horizontale krachten in de muur over te dragen. Hier zit zelden een latei. Een latei geeft hier slechts versterking tegen doorzakken. Bij deuren op de eerste etage die erboven staan is scheurvorming extra snel het geval. In zeer veel woningen zijn hier dan ook scheuren te zien (foto's volgende pagina). De gemetselde strook boven de deur moeten dan aan beide zijden versterkt worden met GVTW en/of door roestvrij stalen spiraalwapening (wokkels) in de voegen aan te brengen (Figuren volgende pagina). Alle wapening moet breed doorlopen zoals lintvoegwapening die verbonden is aan de lintvoegwapening in de buitenmuren.

Moderne gelijmde muren kunnen wel wat trek/buiging weerstaan, maar in de provincie Groningen zijn deze nauwelijks aanwezig. De Nationale Praktijk Richtlijn (NPR 9998)⁶ geeft tabellen voor de dikte van draagmuren en hun mogelijke deelname aan de sterkteberekening. De benuttingsgraad van de muur α , hangt af van de hoogte/dikte en een rekencoëfficiënt of Dynamische Vergrotingsfactor (DAF, tabel 9.3) die afhangt van een al dan niet excentrische belasting en inklemming. Volgens de NPR moeten ongewapende dragende binnenmuren een dikte hebben die $> 1/15^{\text{de}}$ is van de vrije hoogte. De conclusie is dat ongewapende, slechts 10-11 cm dikke binnenwanden (halfsteens binnen draagmuren in oude woningen), **NIET** meetellen in de sterkteberekening; deze moeten dus versterkt worden wanneer de extra belastingen van het vloerdiafragma erop komen.

⁶ De NPR is een vertaling van de Europese Eurocode 8 in het Nederlands. Deze Engelse Eurocode 8 is goed te begrijpen en toegankelijk voor ingenieurs. Deze Eurocode heeft per land een kaartje die het maximale aardbevingsrisico weergeeft.

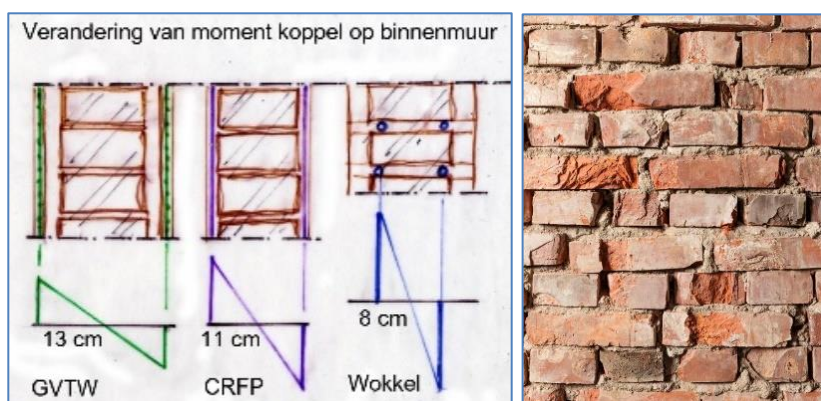


Figuren 6-15. Binnenmuren scheuren vaak boven de deuropeningen. Dit komt omdat de afstand tussen de bovendorpel en de vloer kleiner is dan de afstand van de bovendorpel tot de zijkant van de muur. Het grotere vlak aan de zijkant heeft een grotere sterkte. GVTW en wokkels voorkomen scheuren. Zie ook Hoofdstuk 7 Lateien.

Bij het tweezijdig versterken van halfsteens binnenmuren is de elasticiteit van het materiaal van belang net zoals de afstand tussen de twee versterkte oppervlaktes. Hoe dikker de muur, hoe sterker. Bij GVTW of CRFP dat óp de muur wordt geplakt is de afstand tussen de twee wapeningen 12 cm of 13 cm afhankelijk van de pleisterlaag aan beide kanten van de muur. Deze pleisterlaag moet erg **goed aan de muur verbonden zijn**; als dit niet het geval is dan moet de pleisterlaag eerst verwijderd worden, waardoor de afstand tussen de twee oppervlakten en het weerstandsmoment kleiner worden.

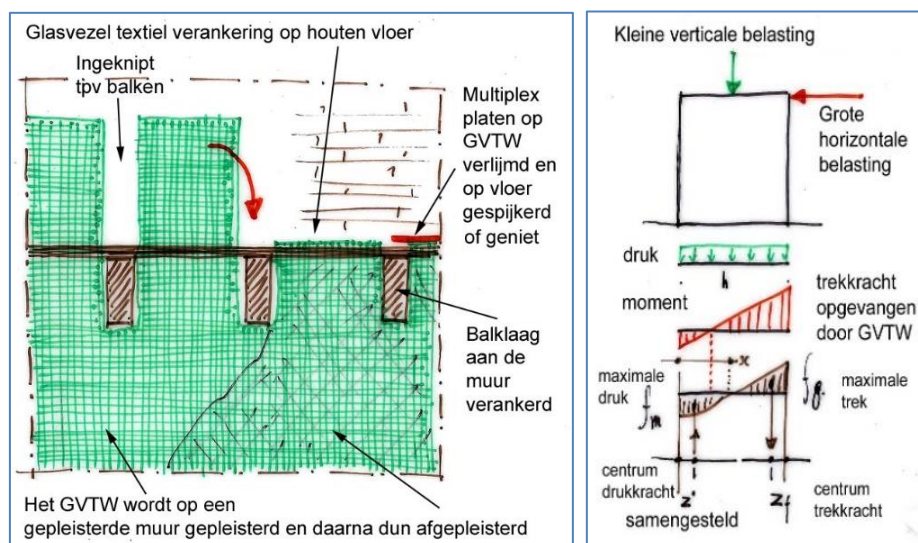
Bij de toepassing van in-gefreesde spiraalwapening (wokkels) aan twee kanten van de muur is de afstand tussen de staven hooguit 8 cm, maar de staven zijn altijd sterk in-gelijmd en kunnen dus grote krachten opnemen. Vooral bij weinig hoogte tussen de bovenkant van de deurkozijnen en het plafond is dan de in-gefreesde rvs-spiraalwapening een praktische oplossing. Bij kalksteen is de verlijjmsterkte minder dan bij baksteen.

Figuren 6-16. Afstand tussen verschillende wapeningen. Bij opgeplakte GVTW is het momentkoppel op een gepleisterde muur ≈ 13 cm. Bij op de bakstenen geplakte sterkere CRFP is het momentkoppel ≈ 11 cm. Bij in-gefreesde spiraalwapening is het momentkoppel ≈ 8 cm.



De binnenkant van steens buitenmuren hebben vaak een erg ruw niet-afgewerkt oppervlak dat eerst geëgaliseerd moet worden. De foto op de vorige pagina laat een voorbeeld van een gestripte testwoning zien. Op deze muren zat origineel een tengel, met daarover jute en behang.

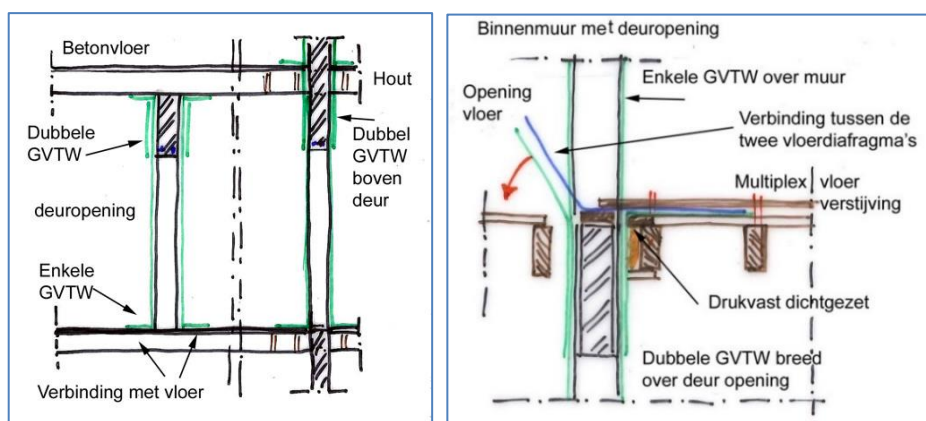
Figuren 6-17. Textiel wapening doorzetten naar boven. Bij een korte afstand tussen deur en plafond, met een deur daarboven, zullen verticale scheuren tussen de deuren ontstaan. Hier zijn minimaal twee spiraal lintvoeg wapening nodig aan beide zijden van de muur.



Het GVTW wordt zoveel mogelijk doorgezet op de binnenmuren van de bovenliggende etage, waarna het vloerdiafragma gemaakt of versterkt kan worden. Rechts. Het GVTW moet de trekkrachten in de muur opvangen, dat kan alleen als het naar boven wordt doorgezet. Links. Het kan ook verbonden worden door het op de bovenliggende vloer te plakken, op het vloerdiafragma.

De verankering van het GVTW of het CRFP over voldoende muurlengte en hoogte is belangrijk. Ook kan het materiaal aansluitend geplakt worden op de dwarsmuren. Deze opties zijn een vorm van seismisch versterken en houden aanzienlijk veel werk in aan de binnenkant van de woning.

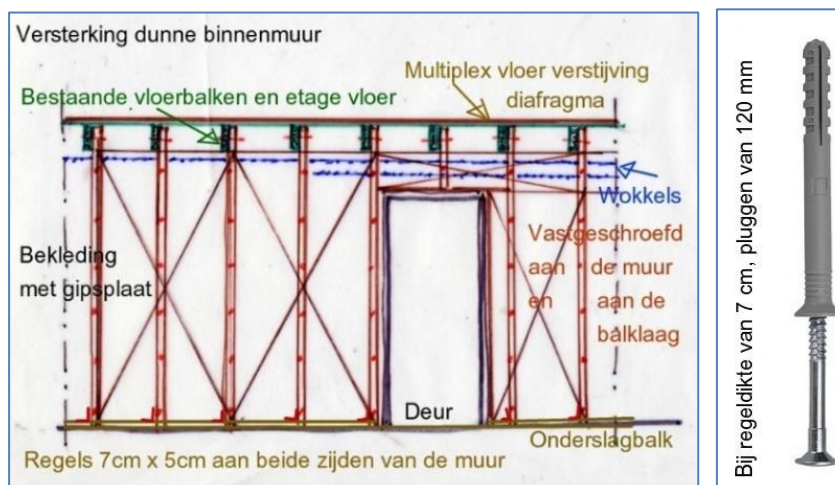
Figuren 6-18. Doorsneden en werkwijze van plakken. Bij een kleine hoogte boven de deuropeningen moet de wapening naar boven doorgezet worden.



6.4. Houtskelet toevoeging op dunne binnenmuren

Een andere eenvoudige manier om binnenmuren licht te versterken is de plaatsing van een houtskelet aan één of twee zijden van de dunne dragende binnenmuur en elke regel of profiel op meerdere plaatsen met de muur te verbinden en met de bovenliggende balklaag (vloerdiafragma). Wanneer de muur aan twee zijden kan worden versterkt, kunnen dunnere regels worden toegepast. Doorkoppeling van de profielen creëert een groter weerstandsmoment. Aan twee zijden bevestigen is meer werk dan aan één zijde vanwege het aantal verankeringen en omdat dan aan twee kanten van de muur het plafond moet worden opengemaakt om de regels aan de balklaag te bevestigen. De beschikbare ruimte zal bij kleine kamers van invloed zijn op de besluitvorming, eveneens de kosten voor de afwerking en het verplaatsen van wandcontactdozen.

Figuren 6-19. Eenzijdig versterken met houtwerk. Op halfsteens binnenmuren kunnen regels worden geschroefd die ook aan de balklaag worden verbonden. De vloer wordt als diafragma versterkt en verstijfd met een multiplex plaat. Bij een dragend binnen-spouwblad kan dezelfde methode worden toegepast met zwaardere profielen voor smalle raampentanten.



De hierboven geschetste versterking is gebaseerd op scheurvoorkoming bij de lichte aardbevingen die zich nog kunnen voordoen in de provincie Groningen. In 2015 werden echter op basis van de hele hoge dreigingskaart van de NPR verschillende ontwerpen gemaakt voor hele zware muurversterking.

Figuren 6-20. Versterking tegen zeer sterke bevingen. Na het maken van een volledige platform-fundering werden hier zware metalen profielen en portalen gebouwd, gebaseerd op een PGAg 0,42 (testwoning Loppersum).



Figuren 6-21. Zware houtconstructies als muur versterking. Links: Zware muurversterking met houtskelet constructie op de binnenzijde buitengevel in een testwoning in Loppersum, gebaseerd op een PGAg 0,36. Rechts: retrofitting van dikkere binnenmuren in New Zealand (zware aardbevingen) > PGAg \approx 0,25.

Wanneer de voor- en achtergevels van een woning muurdelen heeft, kunnen deze volgens dezelfde methode eenzijdig aan de binnenzijde versterkt worden. Vanwege de meestal grote raamopeningen zal het aantal profielen kleiner zijn. Daarom moeten ze groter in doorsnede zijn of er moeten stalen portalen worden toegepast. Bij oudere woning-tussenmuren zijn de muurvlakken groot en moeten loodrecht op hun vlak ook versterkt worden. Vanwege het ruwe oppervlak is de toepassing van profielen dan meer praktisch dan het opplakken van GVTW of CRFP.

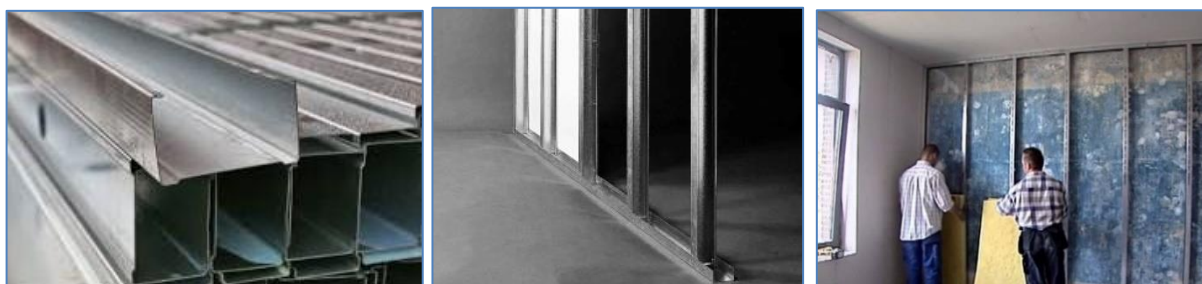
Figuur 6-22. Versterken muur na verwijderen schoorsteen. Na het verwijderen van de schoorsteen verloor de hoge tussenmuur haar stijfheid. Dit werd gecompenseerd door aan beide zijden profielen te plaatsen en die dóór de muur met elkaar te verbinden.

Bij het verwijderen van de schoorsteenmantel op de begane grond is het belangrijk dat het hele schoorsteen kanaal naar boven tot en met boven het dak wordt verwijderd.



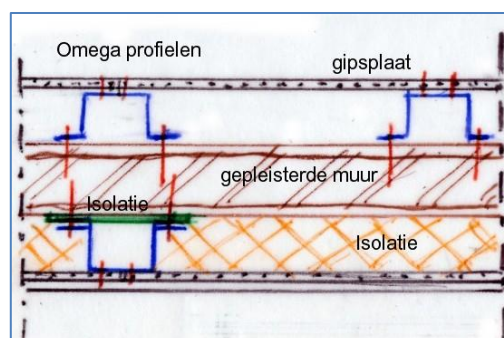
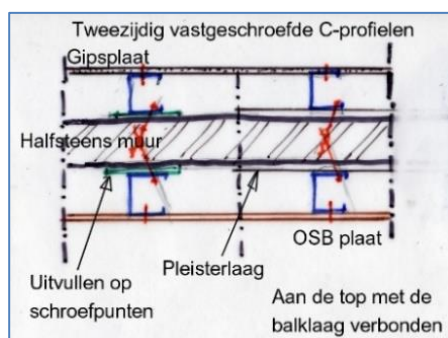
6.5. Stalen C-profielen op binnenmuren

In plaats van houten profielen kunnen ook metalen studs of C-profielen toegepast worden die veelvuldig voor binnenmuurconstructies gebruikt worden. Door deze dunne studs aan beide zijden⁷ van de dunne binnenmuur met elkaar te verbinden ontstaat een goede versteviging. Hiertoe moet de ruimte tussen de stud en de muur op elk verbindingspunt drukvast worden uitgevuld.⁸ De bovenkanten van alle studs moeten sterk aan de balklagen verbonden worden overeenkomstig de houten profielen en met tenminste elke 40 cm een muuranker. Een OSB-plaat afwerking geeft nog meer verstijving.



Figuren 6-23. C-profielen voor lichte binnenmuren. Deze moeten tweezijdig worden toegepast, door ze door de muur heen met elkaar te verbinden.

Verdere versterking geschiedt door opgeschroefde OSB-platen.



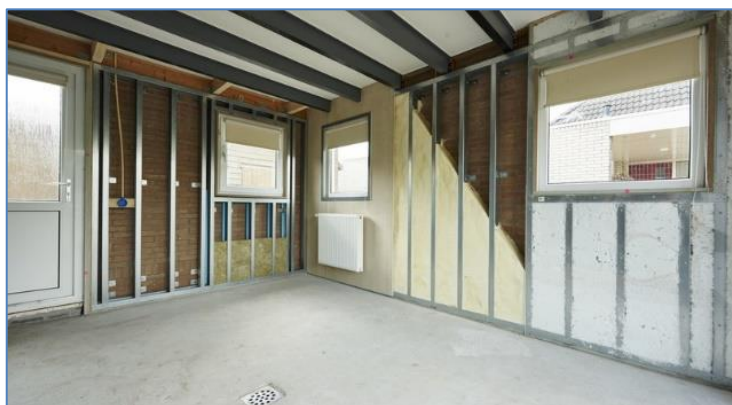
Met plaatstaal C-profielen moet in het profiel de verbinding worden gemaakt. Het fabriceren van profielen met de twee flensen naar buiten zal dan **makkelijker werken** (Ω -profielen).

Als proefprojecten (in testwoningen) werden op basis van de hele hoge NPR9998:2015 (met PGAg 0,42) verschillende woningen overmatig zwaar versterkt met binnenzijdige staalconstructies die op een nieuwe doorlopende bodem-betonplaat werden vastgezet.

⁷ De metalen studs zijn dun gegalvaniseerd en gevouwen plaatstaal en minder stijf dan houten profielen. Daarom moeten aan beide zijden worden toegepast en goed met elkaar verbonden.

⁸ Elke stud staat hierdoor op meerdere plaatsen in direct contact met de muur en aan beide zijden. Hierdoor zal de dikkere wand weinig extra geluidsisolatie hebben t.o.v. de dunne muur.

Figuur 6-24. Proefproject 'Stalen voorzetwanden' in testwoning. Dit voorbeeld werd ontwikkeld door de combinatie van Brands Bouw, DNN Groep, Goudstikker-de Vries, Fischer (muurverankeringen) en DP Engineering. Met verschillende opties voor isolatie en afwerking. Hier nemen de staalprofielen de volledige draagkracht en gebouwsterkte over en zijn de muren slechts belasting.



Bij de versterkingsmethode met houten profielen en bij de metalen C- of Ω -profielen werken deze profielen en eventueel de bekleding (OSB) samen met de binnenmuur om een sterke constructie te krijgen. Gipsplaat is te zwak. Nieuwe elektriciteitsleidingen en dergelijk kunnen achter de bekleding van de voorzetwanden weggewerkt worden. Bij woning-scheidende wanden moet geluidsoverdracht verminderd worden door de toepassing van een trilling-isolerende strook tussen het profiel en de muur. Extra geluidsisolatie kan verkregen worden door katoen (recyclet) isolatiemateriaal.

6.6. Schade varianten bij smalle raam- en deurpenanten

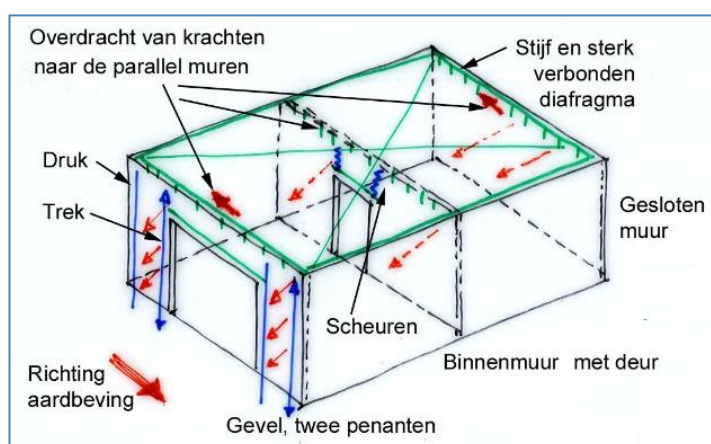
Bij de lichte aardbevingen in de provincie Groningen is de maximale horizontale grondverplaatsing bij PGAg 0,05 maximaal 5 mm in een epicentrum. Dan zal er volgens de laatste dreigingskaart van de NPR-code geen 'seismische versterking' tegen instortingsgevaar meer nodig zijn. Met deze trillingen kunnen echter nog steeds scheuren ontstaan die met voldoende wapening voorkomen kunnen worden. Het technisch verduurzamen van woningen houdt dus enerzijds het versterken in voor het voorkomen van scheuren in en anderzijds het beter thermisch isoleren van de woning.

Aardschokken komen uit alle drie de richtingen. Belastingen loodrecht op het vlak van de muur moeten bij ongewapende muren **altijd voorkomen worden**. Wanneer er in het gebouw geen binnenmuren zijn die de belastingen in het vlak van de muur kunnen opvangen, zullen bij smalle muurbreedtes van raampenanten de belastingen hoog oplopen. Deze smalle penanten moeten daarom extra versterkt worden, of andere constructies zoals portalen of sterke glaspanelen moeten deze krachten opvangen.

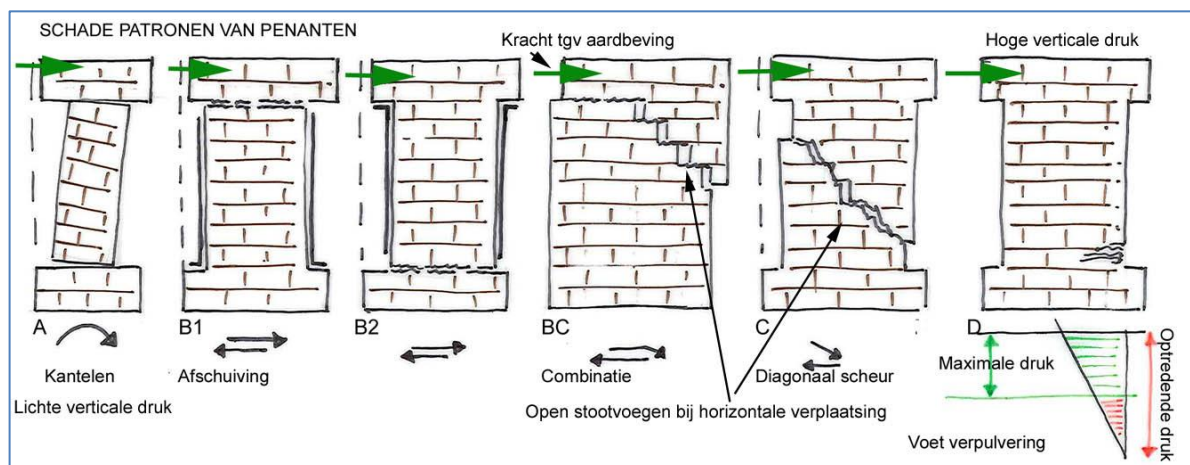
Figuur 6-25. Belasting verloop in de muren bij aardbeving.

In deze schets met vloerdiafragma, zal de binnen dwarsmuur de helft van de vloeren gebouwbelasting op de penanten naast de deur opvangen.

De buitengevel achter en de voorgevel zullen elk 1/4^{de} van de belasting op moeten vangen. Echter, in veel doorzonwoningen is een dergelijke binnenmuur niet aanwezig, terwijl de achtermuur ook uit ramen bestaat.



Smalle penanten kunnen in het vlak van de muur op vier verschillende manieren bezwijken. De onderstaande schetsen geven in het vlak van die penanten één bezwijkrichting aan, maar bij een aardbeving is dit in de twee aan elkaar tegenovergestelde richtingen. De tweede bezwijkvorm van afschuiving (B) is onderverdeeld in drie sub-varianten, waarbij BC een combinatie is met C.



Figuur 6-26. Vier schadevormen aan smalle penanten. Bij een lage boven-belasting scheurt het sneller. Type A is het meest voorkomend. Hoe smaller de penanten, hoe sneller dit gebeurt. Type B ontstaat wanneer een boven- of onderkant van de penant aansluiting versterkt is. Type BC komt veel voor bij een lage bovendruk en een lage afschuivingssterkte.

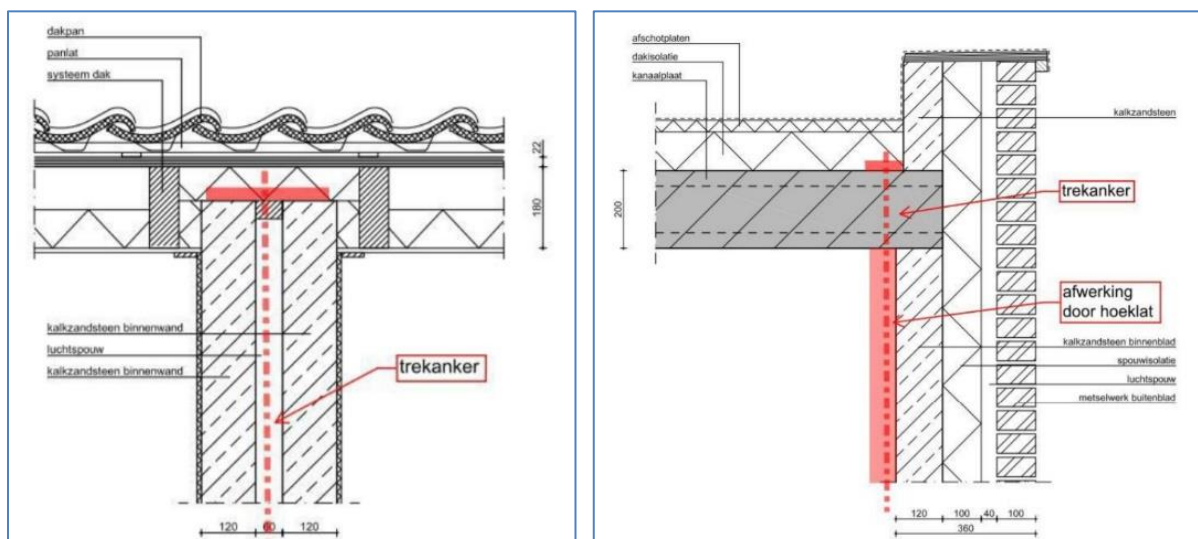
Figuren 6-27. Scheuren typen BC en dubbele C. Links. Typische A-scheur bij lage bovendruk en kanteling.

Rechts: Italië na een tektonische aardbeving. Type dubbele C scheur is dan het meest voorkomend. Door de twee bewegingen ziet men dan de X scheurvorm.



- A. Kantelen ('rocking') van de smalste penanten ($h/b = <1/4$). Hoe smaller het penant, hoe sneller het zal gaan kantelen bij een zijwaartse belasting. Dit gebeurt wanneer de druk van boven laag is en omdat het metselwerk verticaal geen trek kan opnemen. Slechts bij zeer hoge belasting van boven, zoals bij meer dan vier etages, kan de druk van boven de door een aardschok optredende verticale trekkrachten in het penant gedeeltelijk of geheel compenseren. In de Nederlandse rijtjeswoningen zijn de voor- en achtergevels met veel glasoppervlakte zelden dragende constructies en hebben dus een erg lichte boven-belasting; dit verhoogt het kantelrisico. Als de penanten omvallen valt het heel rijtje woningen om.

Het kantelen van smalle penanten kan voorkomen worden door de bovendruk te verhogen, bijvoorbeeld met een op trek belaste verankering aan de fundering. Dit is voor grote muurvlakken niet relevant want die zijn voldoende breed. Dit is echter voor smalle penanten een risico, want daardoor kan de extra druk schade patroon D opleveren (Figuur 6-26, voet verpulvering), waarbij de bakstenen in de hoek kapot gaan. Bij meerdere bewegingen zal het penant toch omvallen. Wanneer er sprake is van een hogere druk zal een kolomconstructie toegepast moeten worden.



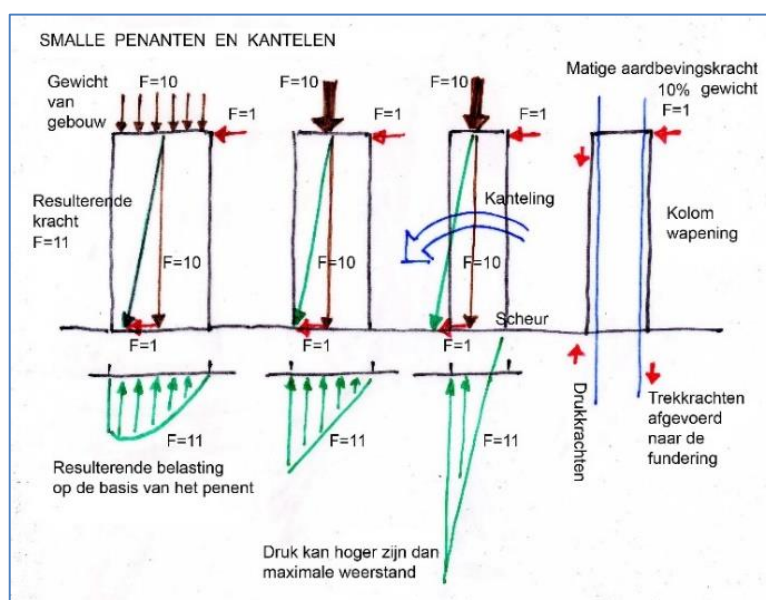
Figuren 6-28. Voorspan ontwerpen voor spouwmuren. Deze optie werd in 2014 voorgesteld door Ing. Bureau SmitWesterman in het kader van de ontwerp competitie. De trekankers naar de fundering lopen door de spouw of met een stijve betonvloer langs de muur. Theoretisch, op het gebied van sterkte is dit een interessante oplossing, maar het probleem in de woningbouw is niet de gesloten kopgevel. Het probleem ligt bij de smalle voor- en achtergevel penanten. Die kunnen misschien wel een extra boven-spanning verdragen, maar niet daar overheen nog eens de aardbevingsbelasting. Alleen strak vastzetten is dan een optie.

De meeste woningen in Groningen met veel scheurschade hebben echter steens-muren en houten balken vloeren, waar het voorspannen langs een kant van de muur een excentrische druk op de muur zal opleveren. Bij een extra excentrische druk is het risico van knik in het muurvlak verhoogd.

Door aan de binnenzijde in steens muurpenanten in de hoogte spiraalwapening in te lijmen, vanaf de fundering tot aan de muurplaat wordt in de meeste gevallen voldoende sterkte geleverd tegen kantelen van smalle muurpenanten.

Figuur 6-29. De krachtenresultante moet binnen de basis vallen. Bij een lage topbelasting op een penant loopt deze resultante minder stijl, waardoor deze naast de smalle basis van het penant zal vallen en het penant gaat kantelen.

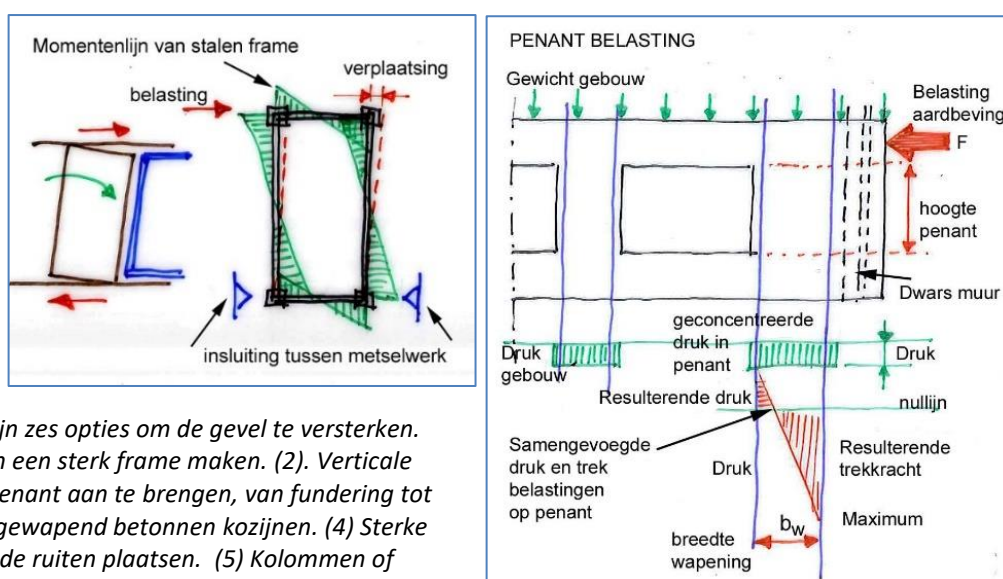
Bij een PGAg 0,05 zal de horizontale belasting ongeveer 5% van de massa boven het raamniveau zijn. Echter, de verticale gebouwbelasting is verdeeld over alle muren, terwijl de volle 5% horizontale belasting alleen in het vlak van de muren (e.g. de smalle penanten) moet worden opgevangen.



Binnenmuren die dragend worden door vloerdiafragma versteviging, zijn makkelijker en lichter te versterken (met GVTW en lichte houtconstructies) dan de smalle raampenanten. Bij de berekening van gebouwen moeten de gezamenlijke muren en penanten (in het vlak) worden berekend op de horizontale belasting en overeenkomstig met de stijfheid van de vloerdiafragma's versterkt.



Figuren 6-30. Veel woningen hebben smalle penanten. Zowel woningen daterend uit rond 1900 met steens muren als naoorlogse woningen met spouwmuren hebben smalle penanten die bij een zijwaartse schok kunnen kantelen. Rechts. De gele markeringen bij deze nieuwe woning geven aan waar horizontale scheuren onder en boven in de penanten ontstonden bij een PGAg 0,06.



Figuren 6-31. Er zijn zes opties om de gevel te versterken. (1) Rond het kozijn een sterk frame maken. (2) Verticale wapening in het penant aan te brengen, van fundering tot dak. (3) Stalen of gewapend betonnen kozijnen. (4) Sterke glaspanelen i.p.v. de ruiten plaatsen. (5) Kolommen of portalen. (6) Maken van een nieuwe gevel.

BC en C. Diagonale scheurvorming (Figuur 6-26) komt vrij veel voor wanneer het metselwerk van slechte kwaliteit of verweerd is en dat daarom de mortel geen afschuifkrachten kan weerstaan en de **bovendruk gering** is. In sommige situaties kan de oorzaak een combinatie zijn van verzakking van een zijmuur met de schok van de aardbeving.

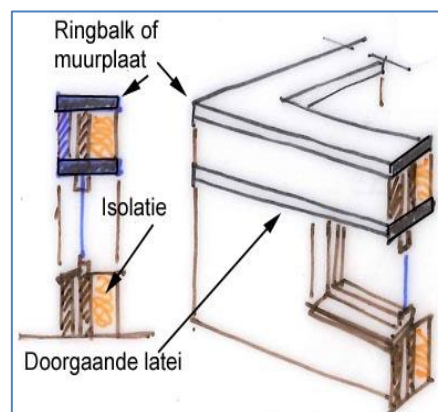
Figuren 6-32. Diagonaalscheur en verschuiving loodrecht op het vlak van de muur. De massa van de bakstenen dakkapel is ook ietsje naar voren gekomen (afschuiving).



Figuren 6-33. Scheuren type BC. Onder de dakrand en bij een muureinde. Deze zijn een combinatie van afschuiving en kanteling van het muurpenant.

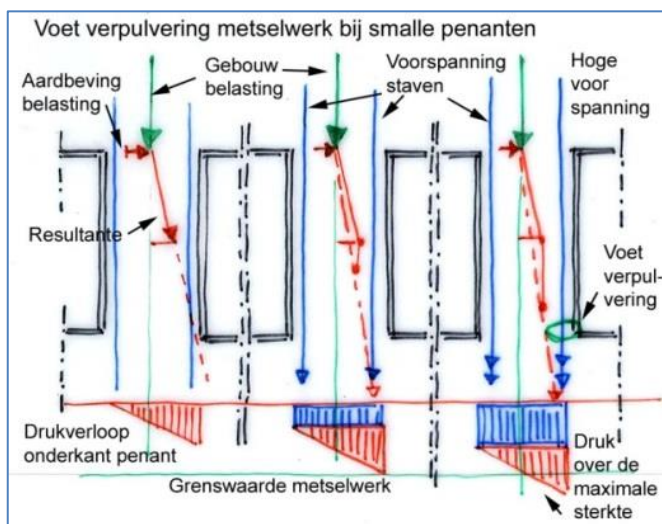


Figuur 6-34. Geen treksterkte boven de ramen. Een doorlopende latei en muurplaat kunnen een verbinding maken met de bredere en sterkere gedeeltes in de gevel of met het vloerdiafragma. Hierdoor wordt voorkomen dat het eindpenant naar de zijkant uitwijkt en het penant gaat draaien.



- A. Voetverpulvering ('toe crushing' Figuur 6-26) ontstaat wanneer er een grote verticale druk op het metselwerk bestaat zoals het geval kan zijn bij meer dan vier etages. Met een al bestaande hoge verticale belasting en de korte aardbevingsbelasting kan de resultante van de verticale en horizontale krachten aan de zijkant van de penant basis vallen, en kan de maximale druksterkte van het metselwerk op dat punt overschreden worden.

Figuur 6-35. Voetverpulvering kan optreden met hoge voorspanning én een beving. Voorspanning is alleen mogelijk bij een goede kwaliteit metselwerk en wanneer er geen excentrische belasting op de dunne muren wordt veroorzaakt. Een optie is om alleen een staaf strak vast te zetten, zodat deze net zoals muurwapening pas gaat werken als er een extra belasting optreedt.

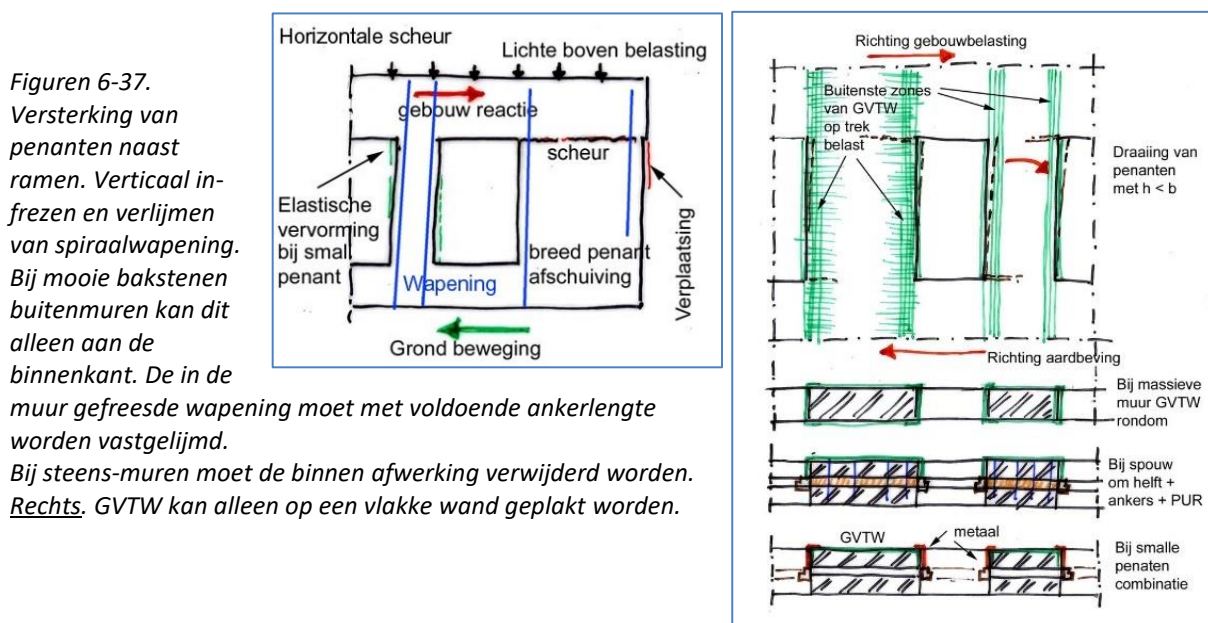


6.7. Versterken van penanten met GVTW

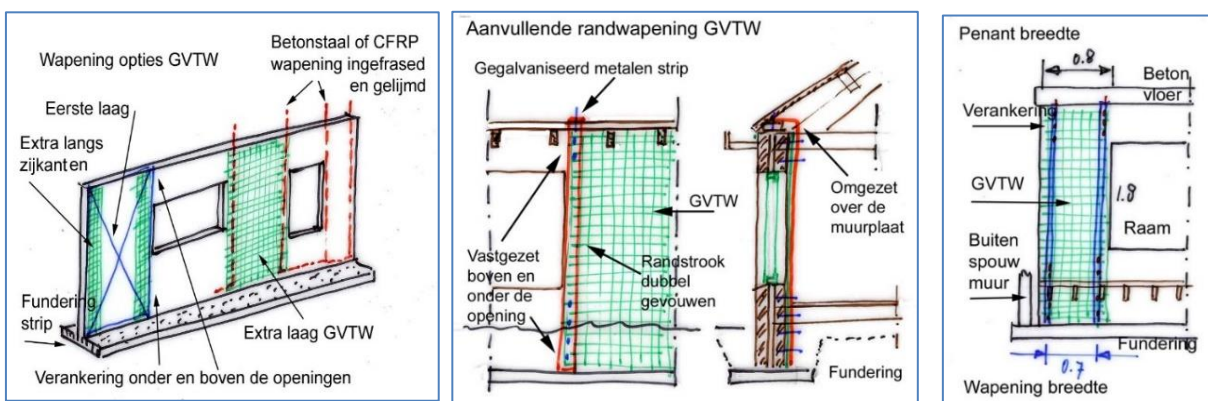
In de gevel van elke woning zijn de raam- en deurpenanten de zwakke schakels. De versterkingsoptie is afhankelijk van de plaats en grootte van die penanten. Bij een algemene verduurzaming van gebouwen kunnen oude kozijnen vervangen worden door beter geïsoleerde kozijnen met raamwerk.



Figuren 6-36. Penanten tussen ramen krijgen het eerste scheuren. Langs de zijkanten van de ramen ontstaat de grootste spanning. Onder en boven de raamopening moet daarom voldoende plaklengte aanwezig zijn om de krachten van het metselwerk over te dragen op het GVTW. Midden. Smalle penanten kunnen met het GVTW rondom worden geplakt wanneer deze penanten aan de buitenzijde worden gepleisterd.



Figuren 6-37. Versterking van penanten naast ramen. Verticaal infrezen en verlijmen van spiraalwapening. Bij mooie bakstenen buitenmuren kan dit alleen aan de binnenkant. De in de muur gefreesde wapening moet met voldoende ankerlengte worden vastgelijmd. Rechts. GVTW kan alleen op een vlakke wand geplakt worden.



Figuren 6-38. Verschillende constructie mogelijkheden met GVTW. Links. Combinatie van GVTW met een extra strook GVTW langs de randen. Combinatie met in-gefreeste spiraalwapening of betonstaal. Alleen wapening. Midden. Stalen verankering moet doorlopen tot in de fundering en aan het plafond/vloer diafragma vastzitten. Rechts. Bij een betonnen vloer is de horizontale bevingsbelasting veel hoger en kan de verticale wapening aan die betonvloer worden vastgemaakt.

Omdat bij een trekbelasting tussen de muur en de dwarsmuur het GVTW los kan raken of een scharnier vormen, is het verstandig om de hoeken te versterken met een extra laag GVTW en een profiel of een metalen hoeklijn die goed aan beide muren is verbonden. In de dikte van de profielen kan aan de binnenkant de buitenmuurisolatie worden aangebracht.



Figuren 6-39. GVTW moet in de hoeken worden vastgehouden. Om lostrekken in de hoeken te voorkomen kan op het dubbel GVTW een hoeklijn of een profiel aan de beide muren worden vastgezet. De dikte van de profielen kan wegvallen in de thermische isolatie. Wat geldt voor GVTW is ook zo voor het sterkere CRFP.

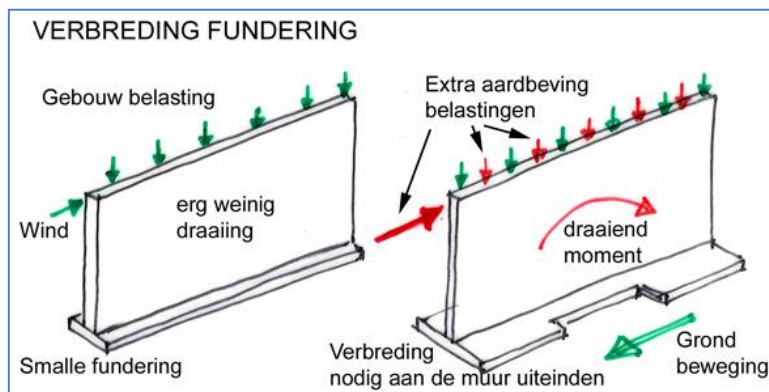
Wanneer de kozijnen worden verwijderd om er in het kader van de verduurzaming nieuwe goed geïsoleerde kozijnen voor triple glas in te plaatsen kan de GVTW eerst rondom de penanten geplakt worden en daarna kozijnen geplaatst.

Figuren 6-40. Penanten anders afwerken. Links. Bij deze woning kan na het verwijderen van de kozijnen het GVTW buitenom vastgeplakt worden zonder verandering in de architectuur.



Rechts. Bij deze rijtjeswoning, met extra smalle penanten op de begane grond, moet een andere oplossing gezocht worden om stabiliteit aan het gebouw te brengen (bijvoorbeeld met portalen).

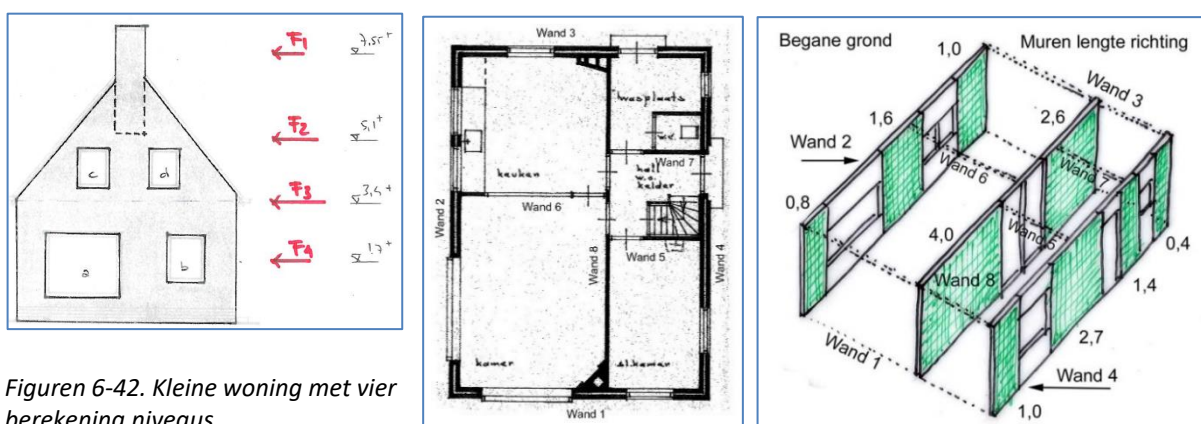
Figuur 6-41. Fundering aanpassen bij hogere plaatselijke belasting. Bij een hogere muurbelasting door de werking van het vloerdiaphragma moet de fundering verbreed en versterkt worden om voldoende draagkracht te behouden.



6.8. Berekening van binnenmuur en penant versterkingen

Voor de berekening van de binnenmuren wordt een kleine woning als voorbeeld genomen, waarbij zich massaberekeningen gemaakt kunnen worden voor een houten etagevloer, of met een stijve betonnen etagevloer (dit voorbeeld). Bij een houten etagevloer moet een sterk en stijf vloerdiagramma gemaakt worden om de krachten over te brengen naar het vlak van de dragende muren. Dat is niet nodig bij een betonnen vloer uit een stuk die niet uit losse prefab elementen bestaat.

Het gebouw wordt op de zwakste doorsnede berekend. Dit is de doorsnede over de raampenanten van de begane grond (links, lijn F4). Alle boven F4 liggende massa en 50% van de nuttige vloerbelastingen moeten worden opgeteld, doch geen sneeuwbelasting bij een schuin dak (>30 graden)⁹. De betonvloer verdeelt de belasting over alle muren. De F4 belasting bij een 10 cm betonnen +2 cm cement etagevloer is afgerond op ≈ 40 ton = 400 kN. Bij een maximale PGAg 0,05 is de horizontale belasting $\approx 0,05 \times 400$ kN = 20 kN. Bij een houten etagevloer is dat flink minder.



Figuren 6-42. Kleine woning met vier berekening niveaus.

Links. Eerst F1 berekenen met de schoorsteen en dan F2 enz. Midden. Plattegrond $8,5 \times 6,5$ m = 55 m² begane grond gebruiksoppervlak. Rechts. Schematische weergave van de raampenanten in één richting.

Volgens bouwtekening zitten in de fundering, ter plaatse van de bovenliggende drie grote openingen (twee ramen en de muur tussen woonkamer en keuken) doorgaande betonbalken. De kwaliteit van de spouwankers werd niet onderzocht; het is echter mogelijk dat in gebouwen uit de jaren 1960 degradatie van de kwaliteit van de spouwankers kan optreden. Dit degradatie risico is nog meer het geval bij gebouwen die dicht bij de kust staan. De vloerbelasting (dunne betonvloer) is op het binnenspouwblad van de gevelmuren en op de halfsteens binnenmuren.

Voor de seismische gebouwbelastingen worden alleen de horizontale belastingen berekend. Deze horizontale krachten moeten worden opgevangen in het vlak van onderliggende muren. De onderliggende dunne binnenmuren (11 cm dik) en binnen spouwmuren (11 cm dik) hebben echter deur- en raamopeningen; alle muren tellen hier mee omdat de betonvloer ze verbindt. Het gebouw heeft in de lengterichting (Y-as) drie muren; wand 2, wand 8 en wand 4.

6.8.1. Berekening in de lengte richting, langs de Y-as.

De horizontale verplaatsing van deze stijve betonvloer ten gevolge van de aardbevingskrachten is overal gelijk. De stijfheid van de muurpenanten is bepalend voor de kracht die elk penant opneemt en evenredig aan de breedte van het penant. De stijfheid van elk penant wordt bepaald door de breedte/hogte verhouding naast de grootste opening. De breedste penanten zijn het stijfste en nemen daarom de grootste krachten op.

⁹ Bij aardbeving berekeningen hoeft maar 50% van de nuttige belasting worden meegeteld en geen sneeuw.

Wand 2: het 1^e raam = 1,8 m hoog; het 2^e raam = 1,3 m hoog

Wand 8: de deuren zijn 2,0 m hoog.

Wand 4: het 1^e raam = 1,5 m hoog; deur 2,0 m hoog; het 2^e raam = 0,7 m hoog

Bij penanten die aan weerszijden verschillende raam- of deurhoogten hebben wordt de grootste hoogte aangenomen. W2: $0,8/1,8 = 0,44$; $1,6/1,8 = 0,89$; $1,0/1,3 = 0,77$. W8: $4,0/2,0 = 2,0$; $2,6/2,0 = 1,3$. W4: $1,0/1,5 = 0,56$; $2,7/2,0 = 1,35$; $1,4/2,0 = 0,7$; $0,4/0,7 = 0,57$. Totaalsom is **8,58**.

De totale belasting F4 van de betonvloer en alles daarboven is ongeveer 40 ton. Bij een aardbeving belasting van PGAg 0,05 is dan de horizontale belasting dan $0,05 \cdot 40 \text{ t} = 2 \text{ ton}$ (20 kN).

De PGAg 0,05 belasting per penant is dan

W2: $0,44 \cdot 2 \text{ t} / 8,58 = 0,1 \text{ t}$; $0,89 \cdot 2 \text{ t} / 8,58 = 0,21 \text{ t}$; $0,77 \cdot 2 \text{ t} / 8,58 = 0,18 \text{ t}$ samen **0,49t** of ongeveer 25% van de totale horizontale kracht;

W8: $2,0 \cdot 2 \text{ t} / 8,58 = 0,47 \text{ t}$; $1,3 \cdot 2 \text{ t} / 8,58 = 0,3 \text{ t}$ samen 0,77t bijna 40% van totale kracht; de rest 35% is:

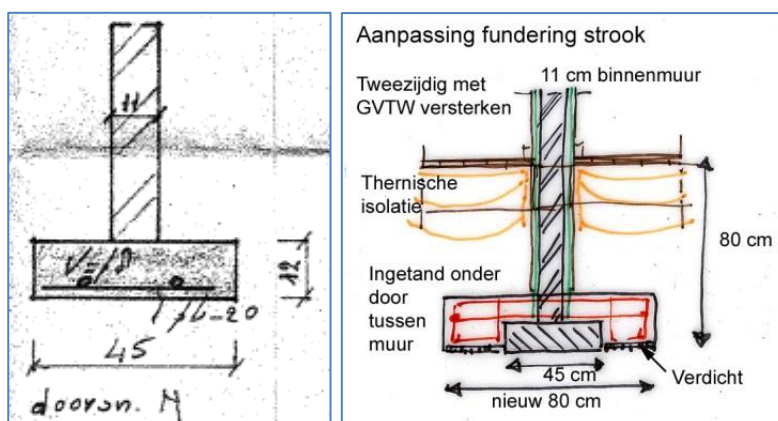
W4: $0,56 \cdot 2 \text{ t} / 8,58 = 0,13 \text{ t}$; $1,35 \cdot 2 \text{ t} / 8,58 = 0,32 \text{ t}$; $0,7 \cdot 2 \text{ t} / 8,58 = 0,16 \text{ t}$; $0,57 \cdot 2 \text{ t} / 8,58 = 0,13 \text{ t}$ samen **0,58t**.

De halfsteens tussenmuur (Wand 8) neemt dus het **merendeel van de kracht op**, maar moet deze naar de smalste van de drie fundering stroken afvoeren. Er zijn twee problemen in deze situatie;

- 1) De dunne tussenmuur W8 moet ook versterkt worden voor belastingen loodrecht op het vlak van de muur, voordat deze belast kan worden in het vlak van de muur. Bij een aardbeving kan bij lichte torsie het risico van knik ontstaan. De binnenmuur moet daarom tweezijdig versterkt worden met GVTW of een houtskelet. Na het versterken kunnen de muurdelen beschouwd worden als staande platen die onder (fundering) en boven (betonvloer) horizontaal zijn opgelegd om de doorbuiging door de horizontale aardbeving belasting t.g.v. het eigen gewicht te weerstaan.
- 2) De opleggingsdruk van een betonnen vloer of balk op de dunne spouwmuur zal aan de kamerzijde van die muur na het ontkisten excentrisch (Figuur 6-44) worden verhoogd door de elastische doorbuiging van die betonnen vloer of balk. Hoe dunner de betonvloer, hoe groter de doorbuiging zal zijn. In deze woning is de betonnen vloer slechts 10 cm dik plus 2 cm cementmortel afwerking.

Figuren 6-43. Mogelijke verbreding van de fundering.

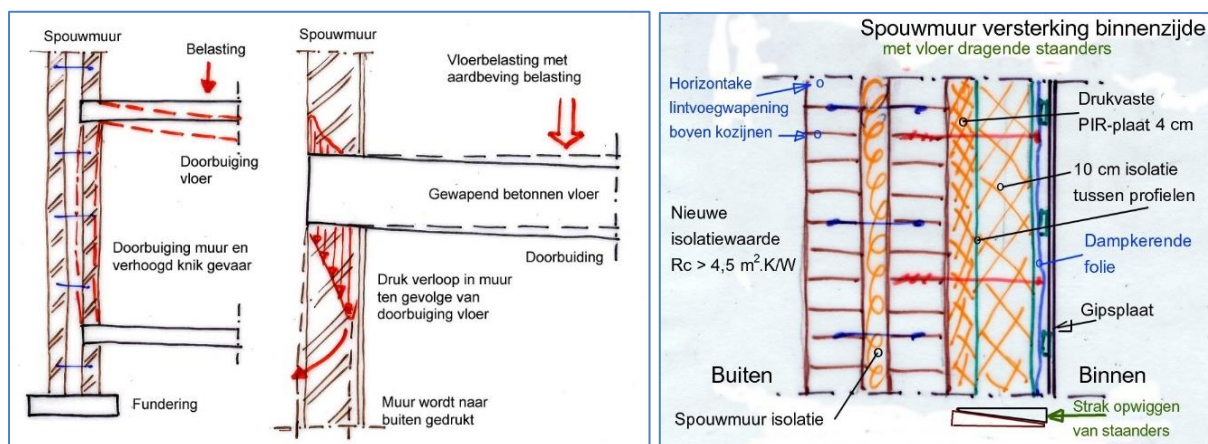
De bouwtekening geeft aan dat de dunne binnenmuren op een smalle funderingsstrook staan. De versterking van de muren moet tot aan de fundering en de fundering moet verbreed worden.



De excentrische druk op de muur kan een uitbuiging van die dunne draagmuur veroorzaken. Bij een verhoogde verticale belasting, gecombineerd met een horizontale aardbevingsbelasting in het vlak van de muur, of een extra horizontale aardbevingsbelasting loodrecht op het vlak van de muur zal het knikgevaar toenemen. Dunne muren, in dit geval ook het binnenblad van de spouwmuren, moeten daarom eerst versterkt worden vóóordat zij de extra aardbevingsbelasting kunnen opnemen.

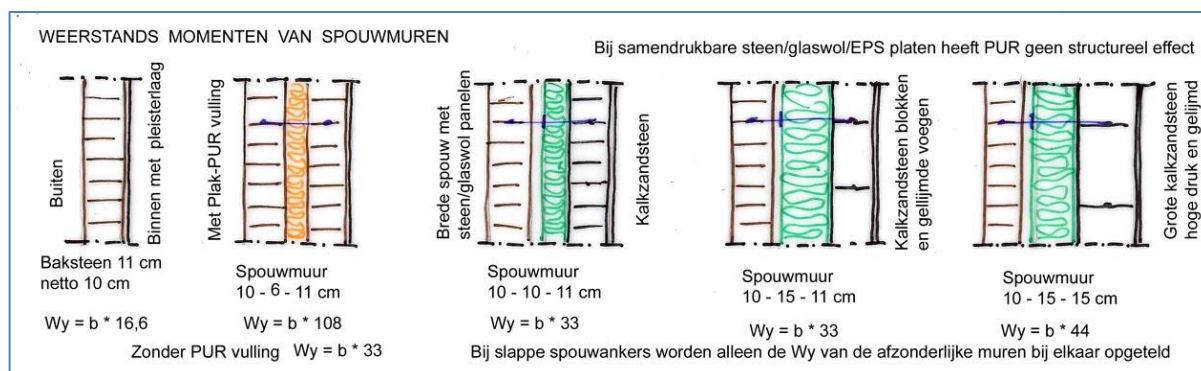
Door het aanbrengen van een dikke isolatie aan de binnenzijde blijft de steens buitenmuur koud en zal minder snel het opgenomen vocht verliezen.

Dit kan leiden tot houtrot wanneer de balken die in de vochtige steens buitenmuur dragen en onvoldoende beschermd zijn tegen condensatie en vocht in die muur. In deze situatie moeten de balken door het binnenzijdige houtskelet gedragen worden.



Figuren 6-44. Excentrische belasting op de spouwmuren of binnenmuur. Brede raampenanten kunnen versterkt worden met een dragend houtskelet. Bij steens muren is het verstandig om bij een houtskelet versterking de vloerbalken op dat houtskelet te laten dragen en niet meer is de on-geïsoleerde buitenmuur.

De spouwmuur kan ook versterkt worden door injecteren van Hoge Dichtheid PUR die de twee spouwbladen intensief aan elkaar verbindt¹⁰. Hierdoor wordt het weerstandsmoment van die spouwmuur ongeveer **driemaal hoger** (W_y 108 ipv W_y 33) omdat het buitenspouwblad dan als een sandwichpaneel meewerkt tegen de doorbuiging.¹¹



Figuur 6-45. Verbetering van spouwmuur sterkte door hare PUR. Het doorbuigingsmoment van een met harde PUR ingevulde spouwmuur 10-6-10 cm is >3x zo hoog als een enkel spouwblad van 10 cm dik. Bij spouwmuren met al bestaande vulling werkt deze oplossing niet.

Het navullen met lichtgewicht beton van een bestaande spouwmuur heeft een groter sterkte-effect dan met HD-PUR, maar moet van bovenaf gedaan worden, is zwaar (nadeel) en ingewikkeld en daardoor kostbaar in de uitvoering.

¹⁰ Dit kan alleen met een nog lege spouw, niet bij een spouwmuur waar al een andere vorm van isolatie in zit.

Het weerstandsmoment van een 10 cm halfsteensmuur is $W_{y10} = (b \cdot h^2)/6 = b \cdot 16,6$

Het weerstandsmoment van een 10-6-10 cm open spouwmuur $2x W_{y10} = b \cdot 33,2$

W_y = weerstandsmoment, h = muurdikte metselwerk, s = dikte spouw, b = breedte 1.

¹¹ Een open spouw heeft iets flexibele spouwankers, waardoor bij een doorbuig situatie de buiten spouwmuur bij een kleine buiging niet meewerkt als weerstand tegen het buigende moment. Hoe harder de HD-PUR is, hoe eerder het buitenspouwblad bij een kleine elastische vervorming mee gaat werken als een sandwichpaneel.

Een 10-6-10 cm muur HD-PUR gevulde spouwmuur is $W_{y26p} \approx (b \cdot h_m^2)/6 - (b \cdot h_s^2)/6 \approx b \cdot 108$. Dus >3x zo hoog.

Bovendien moet er dan binnenzijdig extra geïsoleerd worden. In injecteren met HD-PUR is eenvoudig en snel uit te voeren en voegt goede isolatie toe¹².

Bij de berekening van een spouwmuur loodrecht op het vlak van de muur wordt in veel gevallen slechts de dragende (binnen)muur of -spouwblad op sterkte berekend. Voor de sterkte berekening kan de effectieve dikte van het enkele dragende binnen-spouwblad verhoogd worden met ongeveer 20% ten gevolge van de verbinding aan het buiten-spouwblad. Echter, bij een terug-liggende voeg of slecht voegwerk is de effectieve dikte van de muur 1-2 cm kleiner.

Voor open spouwmuren kan de volgende muurdikte worden aangenomen:

Effectieve dikte van de muur overeenkomstig Eurocode 6.

$t_{ef} = t$ (feitelijke diktes) voor halfsteens, steens en anderhalf steens massieve muren, niet dragende façades en gevulde baksteen of cementblokken.

$t_{ef} = \sqrt[3]{t_1^3 + t_2^3}$ (formule 4.17) voor spouwmuren waarbij beide muren met ankers aan elkaar verbonden zijn en waarbij t_1 en t_2 de dikte van het spouwblad is.

- Wanneer de effectieve dikte te hoog is ingeschat wanneer het belaste spouwblad een hogere Elasticiteitsmodule heeft, moet met de relatieve stijfheid rekening gehouden worden bij de berekening van t_{ef} .
- Wanneer slechts één spouwblad dragend is kan de formule 4.17 gebruikt worden om de effectieve dikte te berekenen, wanneer de spouwankers voldoende flexibiliteit hebben zodat de belaste muur niet negatief wordt beïnvloed door de onbelaste spouwmuur.
- Bij het berekenen van de effectieve dikte, mag de onbelaste spouwmuur niet dikker worden aangenomen dan de belaste spouwmuur.

Voor de loodrecht op het vlak van de muur berekening van een spouwmuur van 10-6-11 cm (buiten-spouw-binnen), waarbij de 11 cm muur de dragende binnenmuur is wordt de berekening: $t_{ef} = \sqrt[3]{t_1^3 + t_2^3} = \sqrt[3]{1331 + 1000} = \sqrt[3]{2331} = 13,29$ of ruim 20% meer dan de enkele muur.

De intensieve verbinding tussen de spouwbladen door de HD-PUR¹³ maakt dat met de gehele muurdikte gerekend kan worden als een sandwichpaneel.

Elk penant dient vervolgens apart berekend te worden op sterkte of deze de horizontale kracht in het vlak van de muur aankan zonder dat er een kanteffect optreedt. Bij het eerste penant (wand 2 x hoek wand 1) met breedte 0,8 m en dwarskracht van 0,1t = 1 kN is het moment in 0,82 kNm.

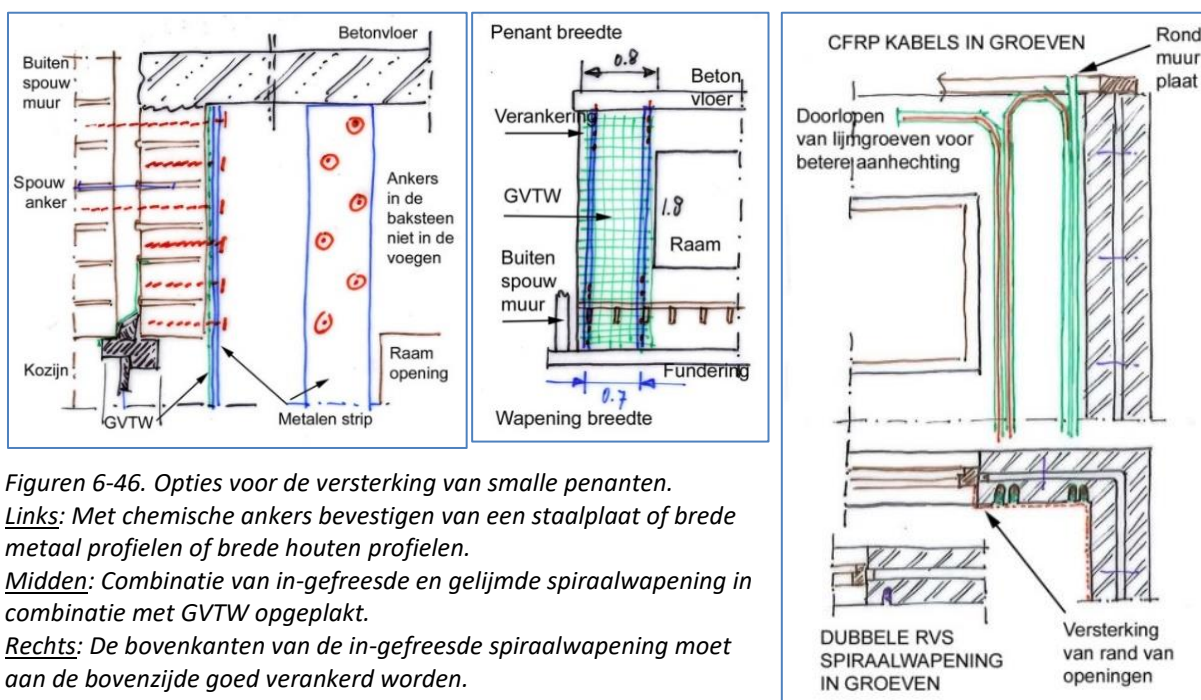
Bij een afstand tussen de wapening strippen van 0,7 m wordt de kracht die elke strip moet kunnen weerstaan 0,82 kNm/0,7 m = 1,17 kN. Bij een treksterkte van staal S 235 (235 Mpa = N/mm²) heeft dit een netto doorsnede nodig van 1170/235 = 5 mm². Een strip van netto 3 mm x 2 mm is voldoende (of spiraalwapening of wokkeldraad Ø 4 mm. Aan elke zijde boven en onder de opening moet deze strip/draad verankerd worden aan het metselwerk, waarbij elke kant een trekkracht van 1,2 kN moet kunnen opnemen. Bij onvoldoende lengte kan de strip breder worden gemaakt.

De zijkanten dubbel beplakken met GVTW is waarschijnlijk voldoende.

¹² Zie Youtube filmpje http://www.youtube.com/watch?v=BXu_fg7sn0 3.20 min. Per m² Bouwen & Verbouwen; Na-isolatie met PUR schuim. Pluimers, purschuim isolatie van spouwmuur, endoscoop en vloeren. HD-Pur schuim is een ander product (andere menging) dan de gewone PUR muurisolatie.

¹³ Vroeger werd er voor PUR het Hydrofluoro-olefins (HFO's) drijfgas gebruikt; dit is per 2022 verboden. Deze kunnen ook voorkomen in airco's en oude koelkasten. Tegenwoordig zijn er meer milieuvriendelijk drijfgassen zoals CO₂ en stikstof. Isolatieschuim is tegenwoordig Icynene, dat wel plakt en stijf wordt maar minder milieubelastend is. De toepassing van Icynene schuim in spouwmuren of onder vloeren is niet te recyclen.

Deze GVTW-toepassing is relevant wanneer het zwakke muren betreft zoals gebouwen van vóór 1800 die nog in kalkmortel zijn gemetseld of zelfs uitsluitend in leemmortel. Dit is soms in combinatie met het feit dat het dan monumenten zijn. In deze situaties is het binnenzijdig versterken gewenst. Voor gewone woningen is het principe van een houtskelet interieur een voordeliger oplossing. Bij smalle penanten is het vaak niet mogelijk om met een sleuvenfrees twee spiraalwapeningen met voldoende afstand tot de dag van het raam en van elkaar in te frezen. In deze situatie is dan een hout- of staalconstructie de aangewezen optie. In combinatie met de binnenzijdige thermische isolatie zal dan de dag van het raam aanzienlijk breder worden.



Figuren 6-46. Opties voor de versterking van smalle penanten.

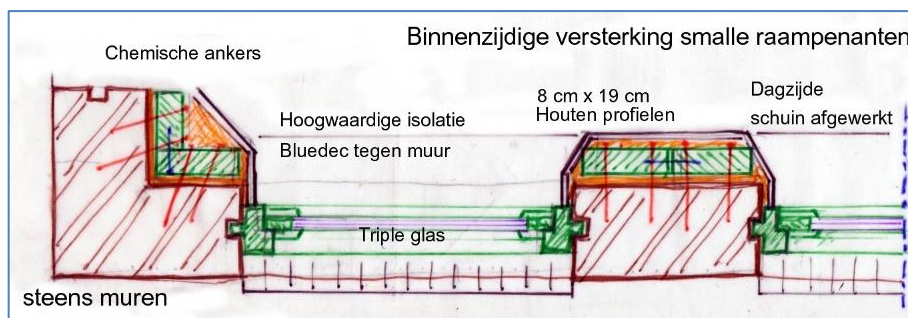
Links: Met chemische ankers bevestigen van een staalplaat of brede metaal profielen of brede houten profielen.

Midden: Combinatie van in-gefreesde en gelijkde spiraalwapening in combinatie met GVTW opgeplakt.

Rechts: De bovenkanten van de in-gefreesde spiraalwapening moet aan de bovenzijde goed verankerd worden.

Figuur 6-47. Versterking met houten profielen.

Deze moeten met chemische ankers aan de muur worden vastgezet, vooral onder en boven de kozijnen.



Figuren 6-48. Erg smalle raampenanten is er geen breedte.

Wapening in frezen lukt hier niet. In dit geval zijn er kolommen nodig om sterke glaspanelen strak in de kozijnen te plaatsen. Hierdoor wordt het penant verbreed.



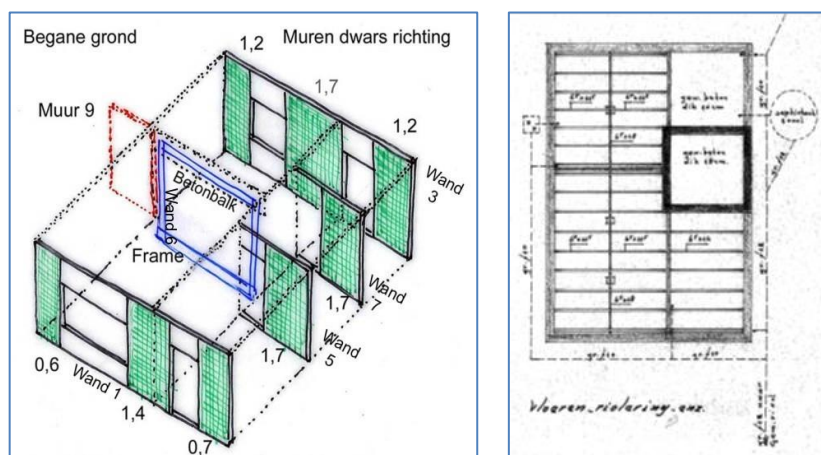
6.8.2. Berekening in de dwarsrichting, langs de X-as.

De sterkteberekening van de X-as dwarsrichting volgt hetzelfde principe als voor de Y-as. Hier is echter de Wand 6 tussen de keuken en de kamer een opening met een dunne, hoge betonbalk die op een muurverdikking steunt die aan de buitenmuur zit. Bij de gangmuur Wand 3 steunt deze balk op die halfsteens gangmuur, maar juist boven twee deuren. Een hele zwakke constructie. Deze penanten in de X-as richting met de deuren er naast zijn daarom zwakker dan de penanten in de Y-as richting.

Figuren 6-49. Muren in de dwarsrichting met plattegrond.

Links. De blauwe betonbalk draagt een houten scheidingsmuur op de eerste etage.

Rechts. De plattegrond toont een kelder onder wanden 5 en 7.



De breedte/hoogte verhoudingen zijn als volgt:

W1: $0,6/1,8 = 0,33$; $1,4/2,0 = 0,7$; $0,7/2,0 = 0,35$. W3: $1,2/1,2 = 1,0$; $1,7/2,0 = 0,85$; $1,2/2,0 = 0,6$.

W5: $1,7/2,0 = 0,85$; W6 is te smal; W7: $1,7/2,0 = 0,85$. De som is totaal **5,53** eenheden.

Dit is 63% van de Y richting (8,58) en dus is het gebouw in deze richting zwakker.

De PGA 0,05g belasting per penant is dan W1: $0,33 \cdot 2t/5,53 = 0,12t$; $0,7 \cdot 2t/5,53 = 0,25t$; $0,35 \cdot 2t/5,53 = 0,13t$ samen **0,5t** of 25% van de totale horizontale kracht;

W5: $0,85 \cdot 2t/5,53 = 0,31t$; W7: $0,85 \cdot 2t/5,53 = 0,31t$ samen **0,62t** of 30% van totale kracht; en

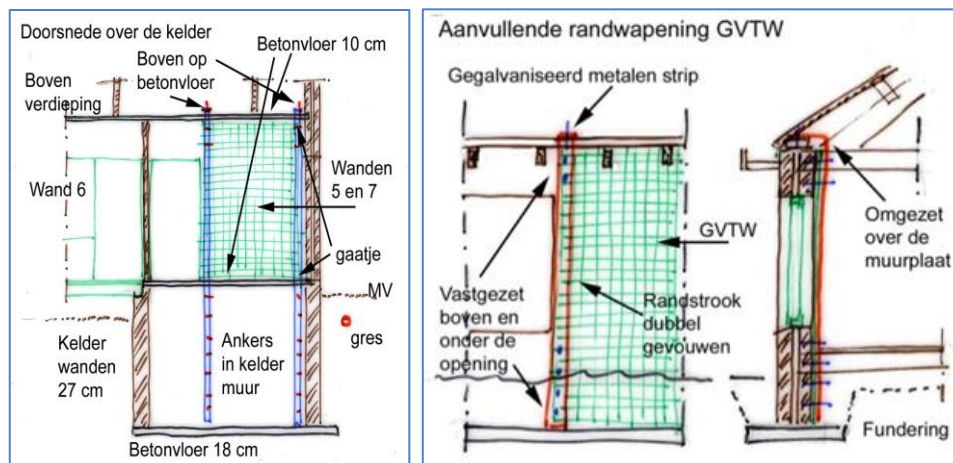
W3: $1,0 \cdot 2t/5,53 = 0,36t$; $0,85 \cdot 2t/5,53 = 0,31t$; $0,6 \cdot 2t/5,53 = 0,22t$; samen **0,89t** of 45%.

Omdat 45% van de sterkte door de achtermuur wand 3 wordt opgenomen, zal de mogelijkheid bestaan dat er lichte torsie gaat optreden. Wand 9 of wand 1 kunnen dit voorkomen.

Om de stabiliteit in de dwarsrichting te verbeteren zijn vier opties mogelijk:

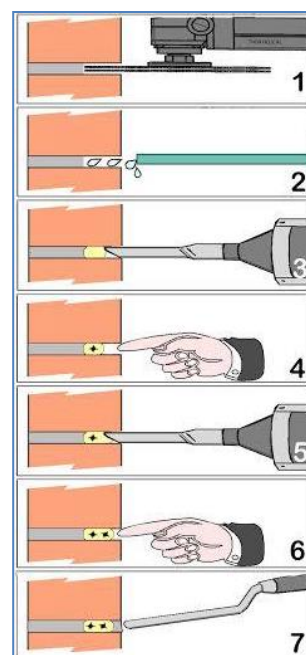
- Het maken van een momentsterk stalen frame (bouw in de schets) dat onder het betonnen plafond aan de vloer-betonbalk en Wand 6 wordt verbonden, en dat op een nieuwe bredere fundering wordt verankerd. Deze constructie is een grote bouwkundige operatie.
- Het maken van een gewapende steun muur #9 aan de buitenkant naast het huis, met een brede eigen fundering; eenvoudig aan te leggen. Aan de bovenkant van het muurtje dient een trek-druk vaste verbinding gemaakt te worden met de betonbalk met vloer (Wand 6). Bij deze optie wordt echter nog niet de aansluiting tussen de balk en wand 3 versterkt. Hier moet dan een stalen kolom worden toegepast.
- Het extra verstevigen van de twee binnenmuren Wand 5 en Wand 7. Deze twee muren zijn halfsteens die naar beneden in de kelder doorlopen. De metalen versterkingsstrippen kunnen aan de onderkant aan de steens keldermuren worden vastgezet, en aan de bovenkant door de betonnen vloer worden geboord, omgebogen en boven op de vloer vastgezet.
- De buitenmuren versterken door sterke glaspanelen in de kozijnen te plaatsen. Dit is veruit de eenvoudigste oplossing.

Figuren 6-50.
Versterking naar de kelder doorzetten.
De twee halfsteens wanden 5 en 7 moeten allebei tweezijdig versterkt worden met GVTW. Om een extra metalen strip wapening toe te voegen is niet veel meerwerk.
Verankering van extra wapening aan fundering en op de muurplaat.



Als de versterking van de wanden 5 en 7 onvoldoende is zou de extra buitenmuur Wand 9 met fundering overwogen kunnen worden, want een interne metaalconstructie is aanzienlijk meer gecompliceerd en vereist ook extra breed fundering werk onder de begane grondvloer. De bovenstaande berekening laat zien dat bij de maximale PGAg van <0.05 meeste bakstenen woningen versterkt kunnen worden met GVTW of houtskelet toevoeging, waarbij slechts bij de smalste penanten extra trekwapening moet worden opgebracht of in-gefreesd.

Figuren 6-51. Afbeeldingen van Helifix. Roestvrij stalen spiraalwapening. Deze wokkels kunnen in bakstenen muren worden vastgelijmd. Enkele of dubbele wapening. Voor de buitenzijde afwerking in de kleur van het oude voegwerk.



De methode van aanbrengen is vrij eenvoudig.

1. Voeg inslijpen met korund-schijf.
2. Schoonspuiten.
3. Lijntje epoxy lijm inspuiten.
4. Wokkel in de epoxylijm drukken.
5. Eventueel een tweede voorlijmen.
6. Tweede wokkel in de epoxylijm drukken.
7. Afvoegen in de kleur van de andere lintvoegen.

Figuren 6-52. Penanten met Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP) in textielstroken.
Deze worden op sterke baksteen vastgelijmd, en op een redelijk vlak oppervlak. Kalksteen, gipsblokken en zachte pleisterlagen zijn te zwakke ondergronden voor het plakken van CFRP-textiel.
Afbeeldingen zijn van Mapegrid.



Aramide (Kevlar, Twaron, Technora) is een variant van CFRP met iets gunstiger karakteristieken van de elasticiteitsmodule, die dichterbij die van beton en baksteen ligt dan Carbonfibers.¹⁴ Commerciële varianten van de CFRP zijn bijvoorbeeld S&P ARMO-mesh¹⁵ of Mapei Mapegrid.

Het materiaal is aanzienlijk sterker dan het metselwerk, waardoor er bij smalle stroken of korte lengtes slechts een geringe of onvoldoende aanhechting capaciteit kan worden verkregen¹⁶. Onvolledige benutting van CFRP-materiaal, of bredere stroken toepassen maakt het duur.

De elasticiteitsmodule voor rode baksteen is tussen de 1 en 7 Gpa (1000 - 7000 Mpa).

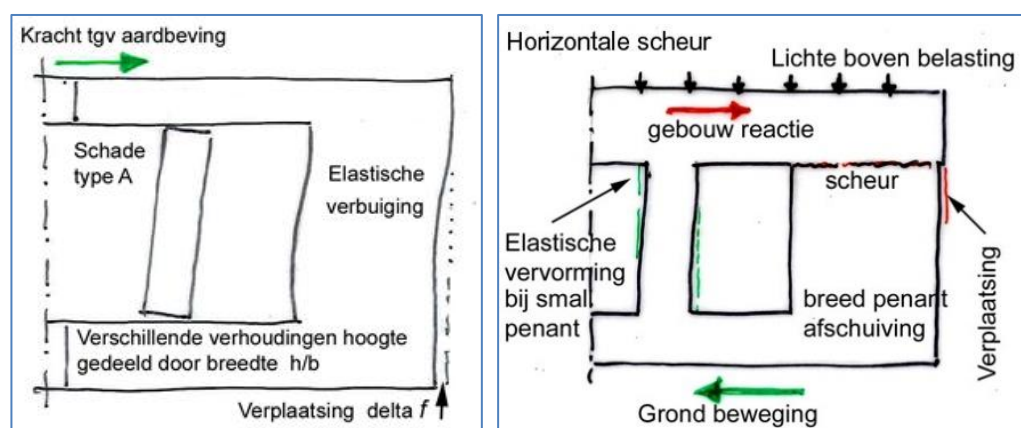
De elasticiteitsmodule voor GVTW is 65-76 Gpa bij SikaWrap, en 83 Gpa bij Mapei Mapegrid¹⁷ 220.

De elasticiteitsmodule voor CFRP (*HS high strength*) is 240 Gpa, en bij 'HM high modulus' is 640 Gpa.

De treksterkte voor GVTW-materiaal is 1,7 – 3 Gpa, en voor CFRP is dit 2,5 – 5 Gpa.

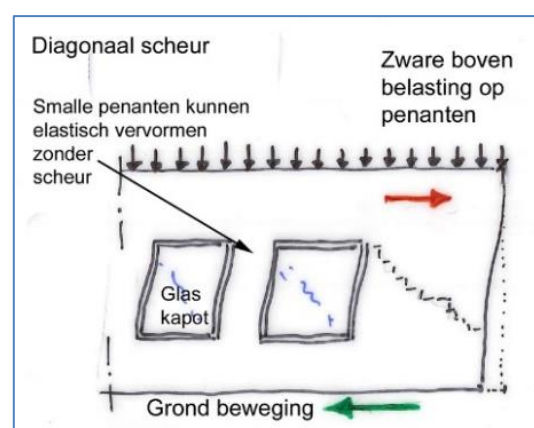
6.9. Ongelijke krachtverdeling tussen penanten

In de vorige sector 6.8 wordt aangegeven dat de penanten in de gevel bij verschillende breedte/hoogte verhouding verschillende krachten opnemen. Het stijve metselwerk laat een zeer beperkte elastische beweging toe. Smalle penanten (e.g. $b/h < 0,4$) zullen bij horizontale overbelasting gaan kantelen. Om de sterkte van een gevel met meerdere penantverhoudingen te berekenen, moeten de verschillende penanten apart worden uitgerekend op basis van dezelfde maximaal berekende verplaatsing Δf .



Figuren 6-53. Horizontale verplaatsing van penanten. Bij de horizontale verplaatsing van het vloerdiafragma en sterke koppeling van de spouwankers, kunnen er drie situaties in een gevel ontstaan.

- (1) Boven. Het smalle penant kan kantelen en het bredere penant elastisch vervormen, of
- (2) Rechtsboven. Het smalle penant kan elastisch vervormen en het brede penant afschuiven, of
- (3) Rechts. Het smalle penant kan allebei, kantelen en vervormen en het brede penant kan diagonaal scheuren.



¹⁴ Zie: http://www.traconference.eu/papers/pdfs/TRA2014_Fpaper_18214.pdf

¹⁵ Zie: http://www.reinforcement.ch/fileadmin/redakteur/pdf-en/ARMO-system/Design_Guideline/S_P_ARMO_System_Design_Guideline.pdf

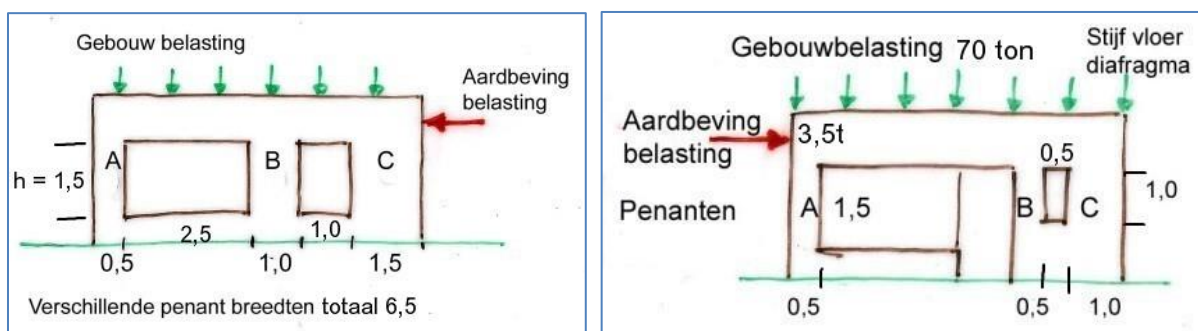
¹⁶ Er zijn in 2014 een aantal testen gedaan met matig resultaat vanwege het slechte kwaliteit van het metselwerk en de aanhechtingsproblemen op dat metselwerk. Dit matige resultaat kan echter ook te maken hebben met kwaliteit van de uitvoering. De toepassing is niet eenvoudig zonder ruime ervaring.

¹⁷ Zie bijvoorbeeld: https://www.archiproducts.com/en/mapei/products/categories_construction/material_glass-fibre

Bij de toepassing van sterke glaspanelen in de opening wordt het gehele penant breder en kan de belastingen in het vlak van de muur makkelijk opnemen. Het glaspaneel kan op de noodzakelijke sterkte berekend worden. Er zijn hier de volgende situaties:

- In de pre-1920 woningbouw zijn er steens-muren waar het houten kozijn in de dag van de opening is gesteld. Het (geharde) glas is vele malen sterker en harder dan het hout. In dit geval (bij goede kwaliteit hout) moet het glas dik genoeg zijn om te voorkomen dat het hout wordt ingedrukt bij een hoge belasting. Er kan een sterke glasplaat in de sponning worden gezet.
- Bij de bouw na 1920 tot 1960 kan het kozijn aan een spouwlat bevestigd zijn en drukt dan zowel op de binnen als op de buitenmuur. De meeste woningen hebben dan nog houten vloeren, dus ook een beperkte aardbevingsbelasting.
- Woningen van na 1960 kunnen betonnen elementenvloeren hebben, waarbij de aardbevingsbelasting op de dragende binnenmuren groot is. Wanneer het kozijn in het buitenspouwblad zit moet dat vervangen worden voor een kozijn in het binnen-spouwblad.
- Bij stijve betonvloeren zal de horizontale verplaatsing op elk penant gelijk zijn, waardoor er in penanten met verschillende breedte of stijfheid onder die stijve vloerschijf verschillende krachten optreden.
- Bij een systeem betonnen vloer moet eerst de vloer als een geheel diafragma worden gemaakt.

Na de seismische verankering en verstijving van het vloerdiafragma wordt de horizontale belasting verdeeld overeenkomstig de stijfheid van de onderliggende penanten. Linker schets beneden: Bij een slappe verdieping vloer is de verticale belasting van penant A $\approx 1,75$ op B $\approx 2,75$ en op C ≈ 2 of samen 6,5. De horizontale aardbevingsbelasting heeft dan ongeveer dezelfde verhoudingen.



Figuren 6-54. De belasting per penant moet worden berekend. Bij een stijf diafragma is de horizontale belasting overeenkomstig de verhouding van de penantbreedte; op C = 3, op B = 2 en op A = 1.

Figuur 6-54 Rechts: Bij ongelijke penanthoogte en ongelijke breedte wordt de verdeling van de horizontale krachten bij een stijf diafragma verdeeld volgens de stijfheid van de penanten b/h :

$A = 0,5/1,5 = 0,33$; $B = 0,5/1,0 = 0,5$; en $C = 1/1 = 1,0$. Samen = **1,83**

Bij een bovenliggende constructiemassa van 70t en een $PGA_g \approx 0,05$ is de horizontale component $0,05 \times 70 = 3,5t = \mathbf{35kN}$

Per penant: $A = 0,33 \times 35/1,83 = \mathbf{6,31}$; $B = 0,5 \times 35/1,83 = \mathbf{9,56}$; $C = 1 \times 35/1,83 = \mathbf{19,12}$. Samen = **35 kN**.

Wanneer er echter een sterk metalen frame om het raampje tussen B en C gemaakt kan worden, of het raampje met breedte 0,5 wordt ingevuld, dan wordt het nieuwe penant $D = 2,0$ breed en daarmee worden de belastingverhoudingen anders.

Voor het nieuwe penant b/h wordt dan $D = 2,0/2 = 1$, terwijl $A = 0,33$ blijft. Samen = 1,33.

De belasting wordt dan $A = 0,33 \times 35/1,33 = \mathbf{8,68}$ en voor $D = 1 \times 35/1,33 = \mathbf{26,32}$. Samen = **35 kN**.

Hiermee wordt aangetoond dat het breedste penant ruim 3x grotere belasting neemt dan het smalle.

Deze situatie wordt weer anders bij rijtjeswoningen waarbij soms spiegeling van de gevel voorkomt, of waarbij de dragende binnenmuren al dan niet doorlopen. Bij een doorlopende binnen draagmuur en het versterkte het toiletraampje wordt de berekening van het getekende gedeelte als volgt:

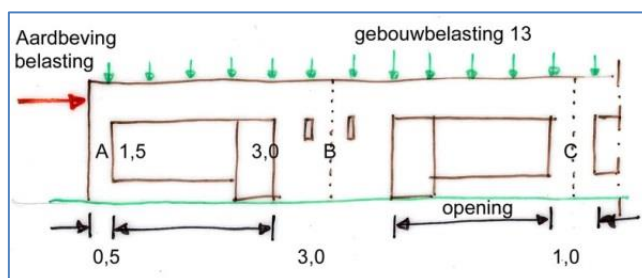
Figuur 6-55. Voorgevel of achtergevel.

$A = 0,33$; $B = 1,0$ en $C = 1,0/1,5 = 0,667$, tezamen 2,0.

De shear-belasting per penant wordt dan voor

$A = 0,33 * 70/2 = 11,55$; $B = 35$ en $C = 23,35$

samen **70kN**.



Bij een rijtjeswoningen kunnen de dragende binnenmuren en diafragma's onderbroken zijn tussen de wooneenheden. In zo'n geval moeten de woningen apart berekend worden. Wanneer de buitengevel doorlopend is gemetseld en met slappe spouwankers vastzit aan de binnenmuur, geldt hetzelfde. Alleen wanneer alle vloeren als verstijving aan elkaar zijn door-gekoppeld kunnen alle woningen tezamen worden berekend. Rijtjeswoningen zijn meestal bezit van woningcorporaties die hun eigen architecten en ingenieursbureaus hebben om de berekeningen uit te voeren.

Over het algemeen is een zich repeterende constructie aan te bevelen (*redundancy*) boven een enkele sterke constructie. De detaillering van de krachtenoverdracht tussen de gebouw onderdelen of tussen belendende woningen is daarbij erg belangrijk.

De onderstaande foto's zijn voorbeelden van smalle penanten die bij het versterken en verbinden van de vloerdiafragma's hoger belast gaan worden. Een erg small penant ($b/h < 0,3$) is veelvuldig voorkomend bij gebouwen met hoge ramen van rond de 1900 eeuwwisseling. Deze smalle penanten kunnen bijna helemaal geen dwarskrachten opvangen en zullen kantelen bij zijbelasting.



Figuren 6-56. Bij bredere raampenanten aan de binnenkant versterken.

Deze versterkingen kunnen worden in-gefreest. Bij de smallere penanten zoals in de bovenstaande foto's zouden er binnen in het gebouw voldoende dwarsmuren moeten bestaan die de krachten opnemen, of er moeten moment-vaste portalen in het gebouw gemaakt worden, die de dwarskrachten van het vloerdiafragma overnemen.

Rechts. De noodzaak voor het maken van moment vaste portalen aan de binnenzijde is bijna altijd het geval bij winkelpuien.



6.10. Versterkingen van voor- en achtergevels met veel openingen

Wanneer er geen binnenmuren zijn, of er niet voldoende grote muurvlakken in de gevel zitten, die via het vloerdiafragma de horizontale krachten in het vlak van de muur op de fundering kunnen overbrengen zitten, zijn andere constructies nodig zoals:

- a. Plaatsen/versterken van dwarsmuren die de horizontale krachten opnemen.
- b. Binnenzijde versterken met zwaardere houten profielen en OSB-platen.
- c. Smalle penanten versterken met brede plaatstaal of U-profielen.
- d. Portaalconstructie binnen van hout of staal.
- e. Versterkte of gewapend betonnen deur- en raamkozijnen.
- f. Versterkte aanbouw aan het gebouw.
- g. Dichtmetselen van een of meerdere ramen.
- h. Sterke of constructieve glaspanelen aanbrengen.
- i. Diagonalen voor en in de raamopening en buitenom, exo-skelet.
- j. Nieuwe sterke en geïsoleerde buitengevel.

Bij al deze opties moet de versterkingsconstructie goed aan het etage vloerdiafragma zijn verbonden.



Figuren 6-57. Oude gebouwen hebben hoge ramen en smalle penanten.



Figuren 6-58. Rijtjes- en doorzonwoningen met houten of betonnen vloeren. Deze zwaardere constructies zijn niet momentsterk aan de tussenmuren verbonden, hebben weinig of geen penanten in de gevels en behoren daarmee tot de zwakste constructies voor aardbevingsbelasting.

Het volgende overzicht vergelijkt de belangrijkste opties:

#	Omschrijving	Voordelen	Nadelen	Advies voor Groningen
a	Plaatsen/versterken van dwarsmuren die de horizontale krachten opnemen.	Werkt i.s.m. vloerdiafragma. Zeer effectief. Krachten naar fundering.	Dunne muren en diens funderingen moeten versterkt worden. Bij nieuwe muren ook funderingen. Veel binnenwerk in de woning.	Bij oude woningen goede optie. Bij rijtjeswoningen niet praktisch.
b	Binnenzijde versterken met zwaardere houten profielen en OSB platen.	Alleen binnenzijde gevels. Kan door kleine aannemers worden uitgevoerd. Tegelijk muurisolatie.	Bij grote raampartijen onvoldoende sterkte in die gevels. Moet soms gecombineerd worden met binnenmuren versterken.	Goed Toepasbaar bij veel woningen.

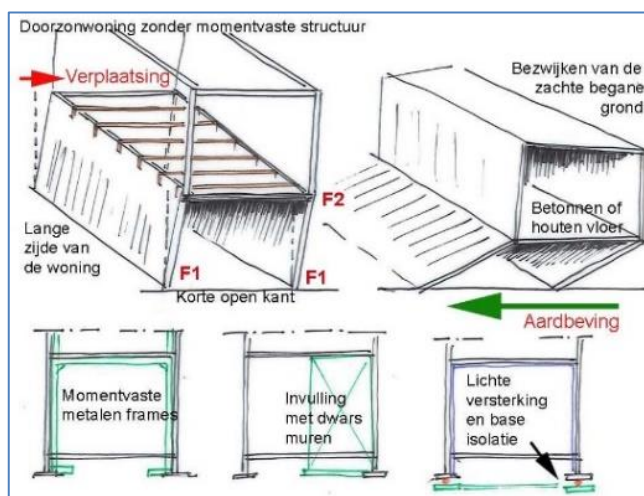
#	Omschrijving	Voordelen	Nadelen	Advies voor Groningen
c	Smalle penanten versterken met brede plaatstaal U-profielen.	Dunne constructie dikte. Weinig breedte nodig. Goed aan baksteen te bevestigen.	Metaalwerk moet op maat gemaakt worden in metaalbedrijf. Roestvorming en warmtelekken moeten voorkomen worden.	Goed toepasbaar bij veel woningen.
d	Portaalconstructie binnen van hout of staal.	Kan goed bij doorzonwoningen.	Moet berekend worden. Aansluiting op fundering moet goed zijn. Hout vis aak niet sterk genoeg.	Bij rijtjeswoningen en bij erg grote raampartijen.
e	Versterkte of gewapend betonnen deur- en raamkozijnen	Aan de buitenzijde van het gebouw. Kan ingepast in oude en nieuwe architectuur.	Moet berekend worden. Vloerdiafragma goed bevestigen. Hangt af van architectuur.	Voor veel kleine woningen mogelijk.
f	Versterkte aanbouw aan het gebouw.	Geen ruimte verlies. Extra woonvolume.	Rooilijnen. Beschikbare buitenruimte. Extra funderingen.	Bij meer behoefte aan woonruimte.
g	Dicht metselen van een of meerdere ramen.	Meteen veel bredere penanten en sterkte in het vlak van de muur.	Verlies van daglicht of raam oppervlakte. Wel ook verdere gevel wapening en vloerdiafragma nodig	Kan maar bij weinig vrijstaande woningen.
h	Sterke of constructieve glaspanelen aanbrengen.	Weinig constructieve aanpassingen aan gevels nodig.	Kozijnen moeten soms aangepast. Wel sterk vloerdiafragma aanleggen. Onbekend.	Vooraf goed bij oude woningen met steens muren.
i	Diagonalen voor en in de raamopening en buitenom, exo-skelet.	Goede oplossing wanneer andere geveldelen sterk genoeg.	Niet iedereen wil diagonalen voor de ramen. Verankeringspunten verdienen speciale aandacht.	Waarschijnlijk weinig belangstelling.
j	Nieuwe sterke en geïsoleerde buitengevel.	Geen ruimteverlies binnen. Beste oplossing voor doorzon- en rijtjeswoningen. Vermindering massa.	Woningcorporaties zijn meestal eigendom van deze complexen. Die gebouwen moeten samen aangepakt. Voor jaren '60 woningen is het niet altijd rendabel	Voor 40% van het woningbestand in de provincie relevant.

In de volgende paragrafen worden de opties gedeeltelijk toegelicht.

6.10.a. Plaatsen/versterken van dwarsmuren die de horizontale krachten opnemen.

Het meest logische is om een centrale of twee symmetrische dwarsmuren te maken, tussen de fundering en de stijve etagevloer, die de dwarskrachten t.g.v. de aardbevingsbelasting op kunnen nemen. De betreffende muur moet in het midden staan of twee muren in symmetrische opstelling om torsie in het gebouw te voorkomen. In bestaande gebouwen verandert dat de indeling en het ruimtegebruik, terwijl in kleine woningen, zoals de meeste rijtjeswoningen er weinig plaats is. Bij vrijstaande woningen kan een steunmuur buiten geplaatst worden.

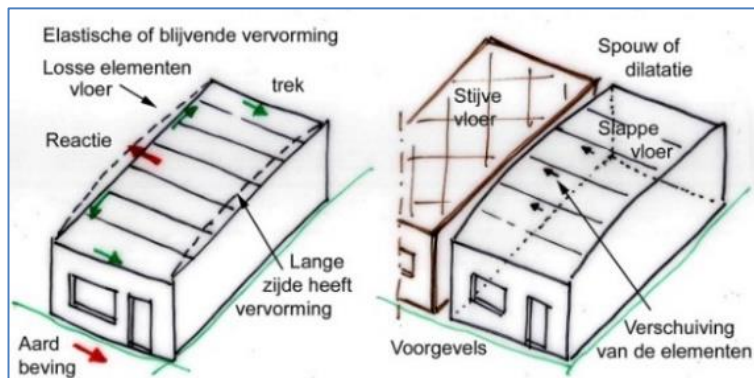
Figuren 6-59. Gietbouw of systeembouw. Van de buitenkant kan niet altijd gezien worden wat de constructie is van het gebouw; of de vloeren momentsterk zijn verbonden, of hoe de kwaliteit van de gevels is.



Wanneer bij rijtjeswoningen de vloeren bestaan uit prefab-elementen dan zijn deze op haar best een beetje ingeklemd tussen de begane grond muur en de etagemuur. Vloerelementen die niet met een wapeningsnet of topvloer met elkaar verbonden zijn, kunnen ten opzichte van elkaar gaan verschuiven. In beide situaties kan een afweging gemaakt worden om elke woning te versterken, of alleen de buitenste woningen, met nieuwe grote ramen in de uiterste zijgevels. Zie 6.10.f.

Figuren 6-60. Alleen buitenste woningen versterken.

Door de buitenste woningen in een lang rijtje goed te versterken, en de vloeren door te koppelen, kan het hele rijtje stabiel worden gemaakt. De dakvlakken moeten ook versterkt worden.



Bij rijtjeswoningen waar in de begane grond gevel slechts enkele kleine raampenanten zijn, kan het verwijderen van een binnen-dwarsmuur (voor een open keuken) een grote invloed hebben op de stabiliteit van het hele gebouw in de lengte (meerdere woningen).

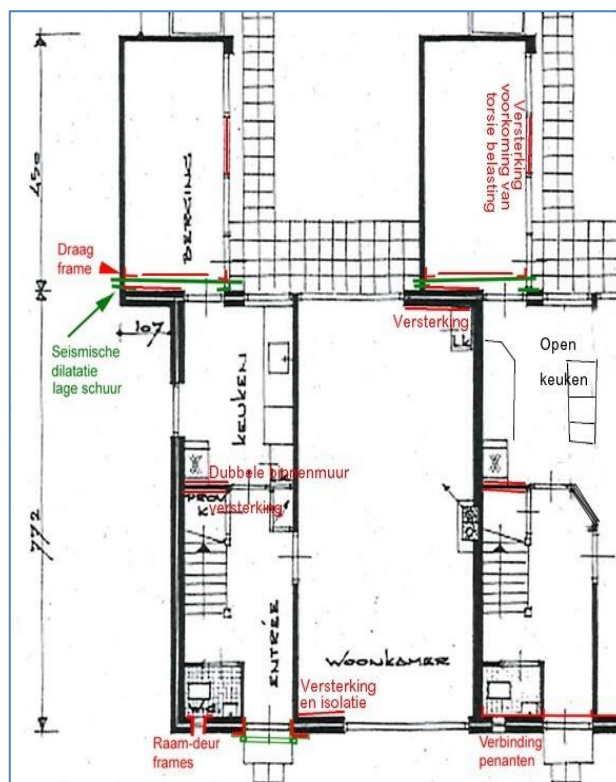


Figuren 6-61. Open keukens maken. Een specifiek probleem is de creatie van open keukens waarbij soms kleine dwarsmuren worden verwijderd.

Rechts: Door bij alle woningen alle kleine muurdelen en penanten te versterken (rood) kan genoeg stabiliteit verkregen worden voor een schadevrije rijtjeswoning bij PGAg 0,05.



Boven. De nieuwe draagbalk is niet momentsterk ingeklemd, maar verzwakking in deze richting is minder relevant omdat de rest van de binnenmuur er nog staat en voldoende de sterkte uit de woning scheidende muren komt.



6.10.b. Binnenzijde versterken met zware houten profielen en OSB platen.

Bij de raamopeningen kan een momentsterk frame binnen op de gevelmuur geschroefd worden, waarbij het ook aan het verstijfde vloerdiagramma is vastgeschroefd. Bij woonhuizen met houten etage vloeren (laag gewicht) is dit een optie. Bij doorzonwoningen die betonnen systeemvloeren hebben is er vaak onvoldoende ruimte aan de zijkanten van de ramen aanwezig, bovendien zijn deze vloeren vaak te zwaar voor deze oplossing. Hier kunnen dan wel kleinere kozijnen geplaatst worden.

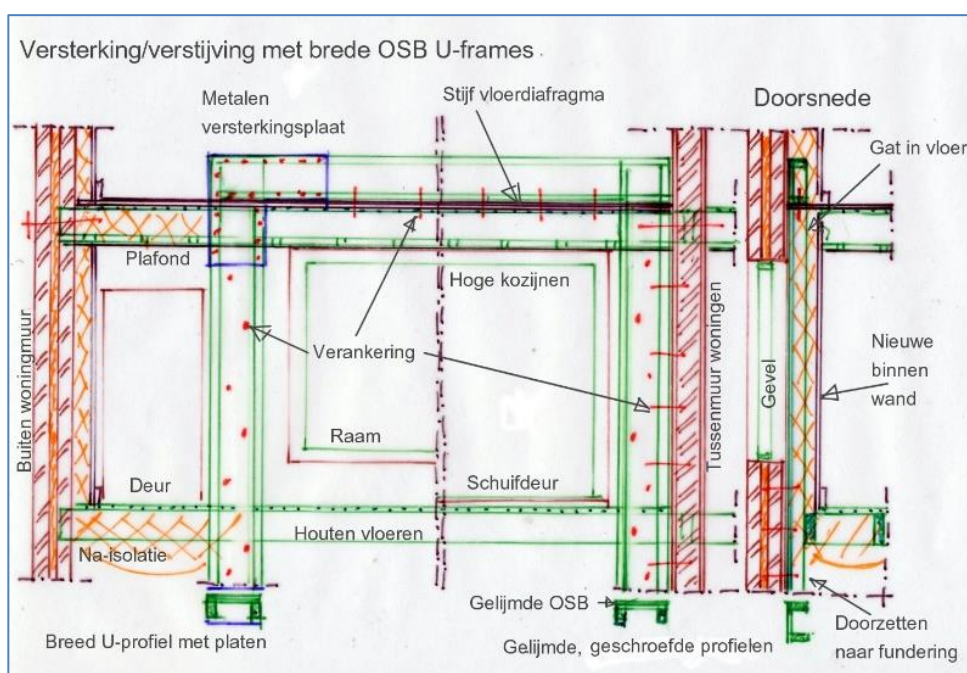
Figuren 6-62. Verschillende muurpenanten. Het linker muurpenant is breed genoeg om er een GVTW op te plakken. Bij smalle penanten kan in-frezen van trekwapening toegepast of hoekprofielen.



Houten constructies zijn veel meer flexibel dan het metselwerk. Bij een vervorming van 1-2 mm ontstaan dan scheuren in het eraan verbonden metselwerk. Er zijn daarom momentstijve hoekverbindingen nodig van voldoende breedte en hoogte. De profielen moeten bij voorkeur tot onder en boven de raamopeningen met chemische ankers aan de muren bevestigd. Met de toepassing van twee op elkaar gelijkde/geschroefde OSB-platen (≥ 30 cm breed) en profielen kunnen brede, stijve stroken worden gemaakt.

Door op beide hoeken van het frame een staalplaat aan te brengen wordt het nog stijver en sterker. De staalplaten zijn dan ook de koppelstukken tussen de twee verticale en het horizontale houten deel dat aan het vloerdiagramma is verbonden. Door de frames tot in de fundering door te laten lopen wordt er aan de onderkant een inklemmingsmoment gecreëerd.

Figuur 6-63. Het samengestelde houten profiel met OSB-platen. Dit kan op de eerste etage onder de ramen tegen de gevel aan en aan het vloerdiagramma verbonden. De hoeken kunnen versterkt worden met metaalplaten. Het frame kan naar de fundering worden doorgetrokken.



Het voordeel van het stijve houten frame is dat het voor kleine vrijstaande woningen makkelijk ter plaatse op maat gemaakt kan worden, waarbij de hoekplaten een standaardafmeting kunnen hebben. De muren hoeven niet vlak te zijn zoals nodig is om GVTW of CFRP te plakken. Het hout moet goed geconserveerd worden en condensvorming in de muur moet voorkomen worden. Tussen het frame en de muur kan een dampdichte folie of Bluedec® worden aangebracht.

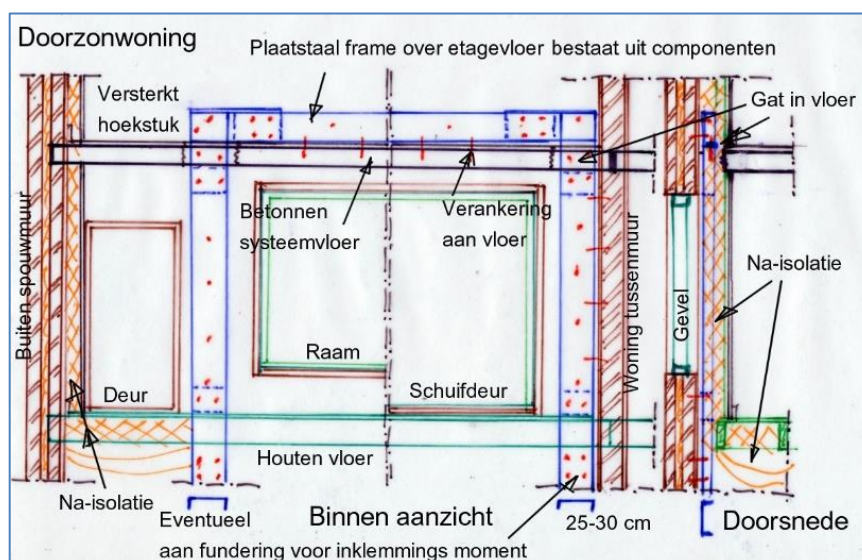
6.10.c. Smalle penanten versterken met brede plaatstaal u-profielen.

Een probleem bij doorzonwoningen is dat bij breed-plaat of andere betonnen systeemvloeren die van een woning tussenmuur naar de andere woning tussenmuur lopen, de ramen tot aan het plafond lopen en er geen ruimte is voor (hoge) balken. De aardbevingsbelastingen zijn bij betonnen vloeren hoger dan bij houten vloeren, waardoor de frames sterker en stijver moeten zijn dan bij lichte woningen. Brede plaatstalen U-profielen in de voor- en achtergevels zijn in deze situatie economischer. Bij doorzonwoningen is dan ook seriematig werk mogelijk.

Figuur 6-64. Geen balkhoogte beschikbaar. Wanneer de ramen in de gevel doorlopen tot aan het plafond is met traditionele methoden geen portaal constructie onder de vloer te maken. Een optie in dit geval is het toepassen van constructieve glaspanelen.



Figuur 6-65. Versterkingsprofiel boven op de vloer. Breed plaatstaal U-profiel door de zijkant van de betonvloer en op het vloerdiafragma en tegen de muur bevestigd.

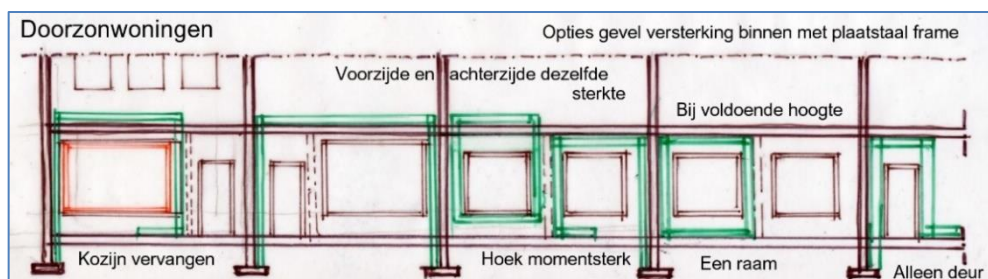


Metalen profielen hebben weinig warmteweerstand en zijn tegen de buitengevel grote warmtelekken. Door tussen de U-profielen en de bakstenen gevel een strookhoogwaardige thermische isolatie e.g. Bluedec® te plaatsen wordt de warmteoverdracht van binnen naar buiten sterk verminderd.¹⁸

Het in de voorgaande secties beschreven versterkingsstelsel kan op verschillende manieren worden uitgevoerd naar gelang de beschikbare ruimte rondom de openingen in de gevels. Belangrijk is dat de versterkingen zo worden geplaatst dat er een sterkte- en stijfheid-symmetrie bestaat aan weerszijden van de gebouw x- en y-assen om torsie te voorkomen. Bij doorzon- en rijtjeswoningen zonder binnen dwarsmuren betekent het dat de voor- en achtergevel op dezelfde wijze versterkt moeten worden.

¹⁸ Zie ook het document 'Lange Warmtelekken Vermijden' op www.nienhuys.info eerste pagina.

Figuur 6-66.
Methoden voor
versterking van
gevel.

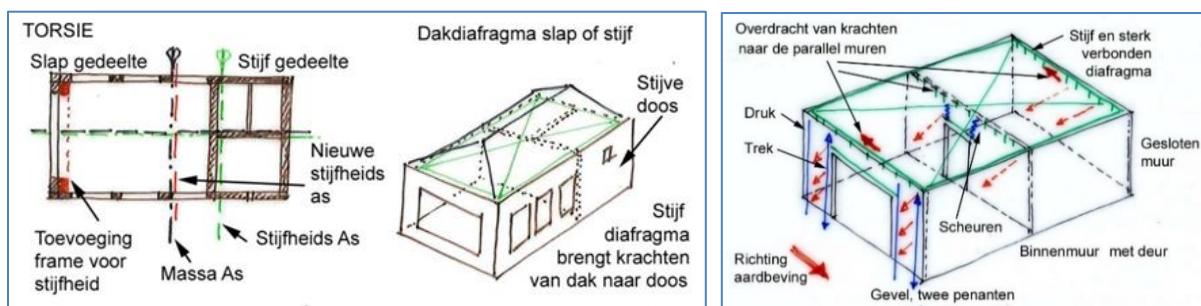


Wanneer oudere ruiten/kozijnen met een lage isolatiewaarde tot aan de woning scheidende muur doorlopen is het beter om het hele kozijn te vervangen voor een smalle goed geïsoleerde versie en met een brede glassponning geschikt voor triple glas. Ook moet vaak de ventilatie herzien worden.

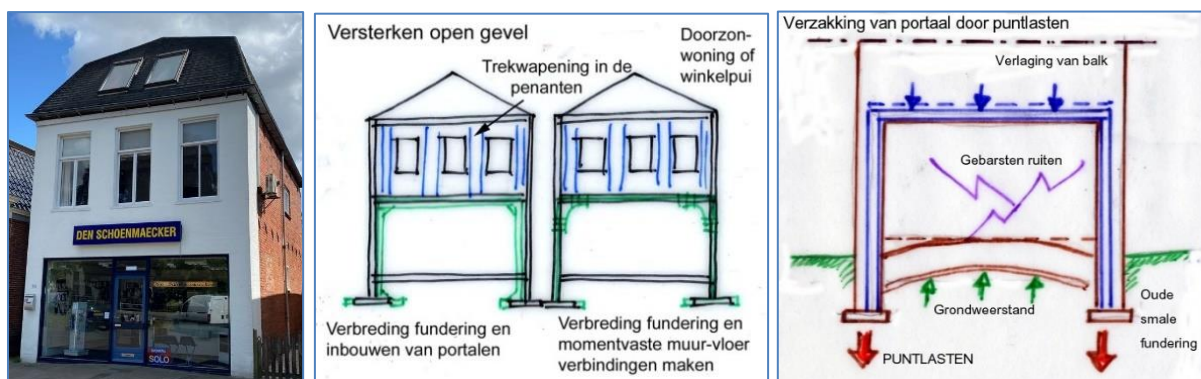
Door de onderste poot van het profiel aan de fundering vast te zetten of aan de betonvloer wordt een momentsterke verbinding verkregen. De profielen vallen weg in de nieuwe binnenzijdige isolatie.

6.10.d. Portaalconstructie binnen van hout of staal.

Hierbij worden stijve portalen binnen in het gebouw geplaatst en aan het bovenliggende stijve vloerdiafragma gekoppeld. Wanneer één zijde van een gebouw in twee richtingen stijve muren heeft, en de andere kant niet, kan torsie ontstaan. Om torsie te voorkomen moet de open zijde versterkt worden met een momentsterk portaal.



Figuren 6-67. Grote raamopeningen aan slechts één zijde van een gebouw. De andere kant heeft gesloten muren en dwarsmuren. Hierdoor ontstaat bij een aardbeving torsie in dat gebouw. Een sterk en doorgaand diafragma dat goed aan de muren is verbonden kan dit opvangen. Een portaal rond de grote opening zal de krachten horizontale daar beter opvangen. Een symmetrische krachtenverdeling geeft een lagere belasting op de andere muren en het diafragma en daardoor minder schaderisico.



Figuren 6-68. Stalen kolommen en balkconstructies bij winkels en doorzonwoningen. Rechts. De portalen moeten aan de onderzijde verbonden worden ter voorkoning van relatieve grond opdruk.

De fundering moet onder portalen verbreed worden om inklinking te voorkomen.

Wanneer de fundering niet verbreed wordt, kan het gehele portaal ietsje zakken, waardoor de grote ruiten kunnen breken omdat de grondweerstand het middengedeelte omhooghoudt. Het horizontaal doorkoppelen van de fundering tussen de portalen voorkomt mogelijke beschadiging van de glasgevel wanneer de fundering verzakt door de aardbevingsbelasting. Het alternatief is om onder de middenmuur een opening te houden.

Bij doorzonwoningen zijn zowel de voor- en achtergevel een open constructie. In het midden van de woning kan dan een portaal gemaakt worden. Door de juiste locatie van dat portaal kunnen de krachten gelijkmatig over de lengte van de woning verdeeld worden.



Figuren 6-69. Voorbeelden van portaalconstructies binnen. Portaalconstructies van beton, hout of staal die op de juiste plaatsen zijn gebouwd, zullen de torsiekrachten op de muren sterk verminderen of elimineren..

Bij grachtenpanden of andere woningen die tegen elkaar aan zijn gebouwd zouden de zwakste gebouwen versterkt moeten worden met GVTW, platte brede U-frames of portalen. Zonder die versterkingen zullen ze bij een schok tegen de belendende gebouwen drukken.

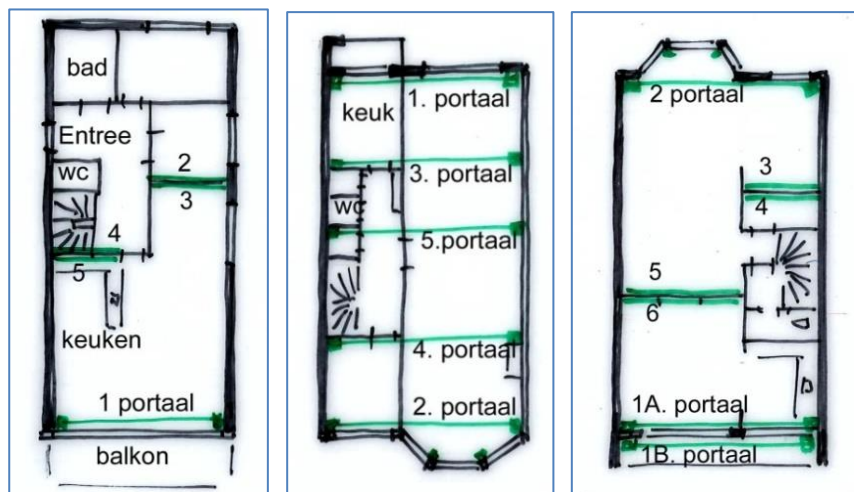
Figuren 6-70. Gebouwen die onvoldoende sterk moeten van elkaar gedilateerd. Zonder dilatatie, kunnen/zullen ze elkaar beschadigen.



Figuren 6-71. Smalle stads- of grachtenwoningen.

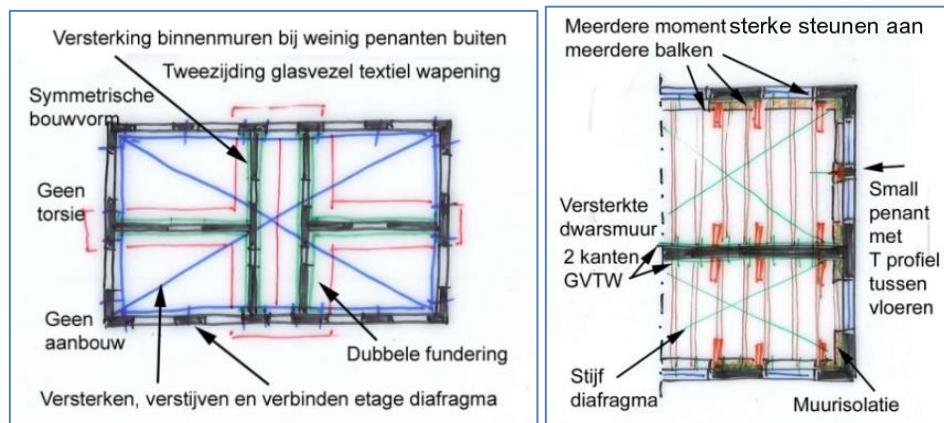
Links: Indien muur 2-3 verstijfd wordt, kan de doorgang niet makkelijk groter worden gemaakt. Bij muur 4-5 kan alleen dun GVTW of CRFP gebruikt worden. Midden: Met portalen blijft de flexibiliteit van de indeling groot.

Midden en Rechts: Afhankelijk van het ontwerp zijn portalen 1+2 voldoende.



Bij de besluitvorming over de te versterken muren moet rekening gehouden worden met de indeling van de woning, omdat de versterkte muur dan niet meer eenvoudig te verwijderen is.

Bij monumenten, of karakteristieke gebouwen is het niet altijd toegestaan om frames aan de binnenzijde van de steens gevels vast te maken. In deze situaties zullen de binnenmuren versterkt moeten worden die dan via het stijve en sterke vloerdiafragma de gevels vasthouden. Extra gebouw belastingen zoals van zware gemetselde schoorstenen moeten voorkomen worden, zodat een oud gebouw niet extra versterkt hoeft te worden om deze extra belastingen op te vangen.



Figuren 6-72. Symmetrisch versterken van het diafragma. Hierdoor kan torsie voorkomen worden. Rood is fundering.

De topzijden van de gevels worden aan het vloerdiafragma verbonden, waarbij de zijwaartse druk van het dak ook door de vloer wordt opgevangen. De horizontale belasting op die geveltoppen is dan minimaal.

6.10.e Versterkte of gewapend betonnen deur- en raamkozijnen.

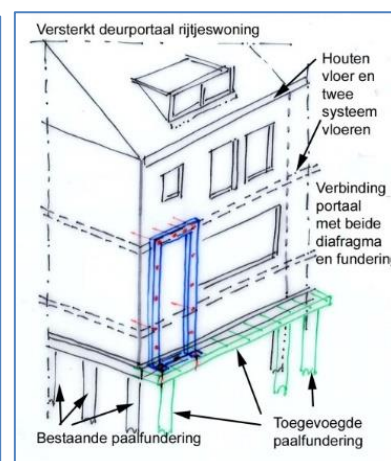
Bij woningen waar wél aan de gevel veranderd mag worden, is het maken van één sterk deur- of raamkozijn omlijsting per geveldeel bij lichte bevingsbelasting vaak voldoende om de gewenste sterkte in het vlak van de muur te maken. Deze omlijsting verbinden met een sterk etagevloer diafragma.



Figuren 6-73. Versterkte raam- of deuroplijstingen.

Deze zijn aan het vloerdiafragma verbonden.

Midden. Voor het monument kan de grijze deuroplijsting vervangen worden door een gelijk uitziend gewapend betonnen frame.

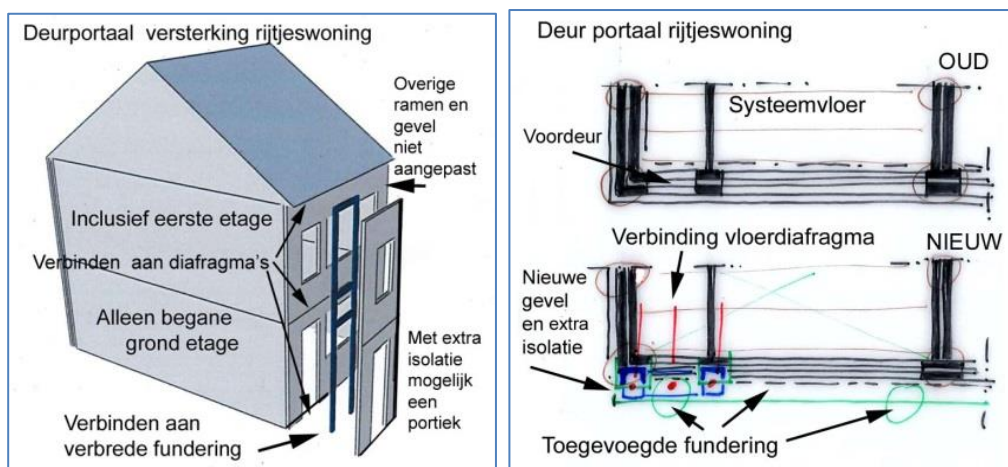


Figuren 6-74. Moderne variant van een frame.

Links. Stalen portaal in glasgevel.

De fundering moet voldoende breedte en sterkte hebben om de puntbelastingen van het versterkte deurportaal op te vangen. Hiervoor kan het nodig zijn dat de fundering verbreed wordt en er extra palen nodig zijn. Bij een dik extra frame moet de rooilijn worden aangepast.

Figuren 6-75.
Sterk deurframe in de gevel.
Dit kan worden weggewerkt, waarbij de grote ramen niet veranderd worden.
Rechts. Verbreding of extra palen nodig.



Bij een herstructurering en een nieuwe architectuur van de gevels is het mogelijk dat er een kleine uitbouw wordt gemaakt waar niet alleen de versterkingsconstructie in zit, maar die bij kleine woningen ook extra ruimte geeft, bijvoorbeeld op de etage bij de badkamer.



Figuren 6-67. Grotere aanpassingen van de gevel. Links: Versterkte voordeurconstructie doorlopend naar boven met badkamer uitbreiding. Midden: Voordeur met dakkapel/badkamer uitbreiding. Rechts: Twee uitbreidingen beneden en boven.

Bij de realisatie van een dergelijke constructie die per rijtjeswoning kan worden toegepast is het volgende van toepassing:

- Beperkte gebouwuuitbreiding is mogelijk. De rooilijnen moeten worden aangepast.
- De constructie moet zowel aan de voorgevel als aan de achtergevel worden toegepast, zodat het gebouw aan beide zijden symmetrisch sterker wordt gemaakt.
- Bij rijtjeswoningen zijn meestal de etagevloeren van stijve prefab gewapende (beton) constructies, die geen volledig diafragma vormen; deze moeten onderling worden verbonden.
- De extra frameconstructie moet sterk aan beide vloerdiafragma verbonden worden (incl. zolder).
- Wanneer er een houten zoldervloer is, en er voldoende gevelpenanten op de etage zijn, kan het sterke deurportaal slechts van de fundering tot aan de eerste etagevloer lopen.
- De fundering moet voldoende breedte en sterkte hebben om de extra momentkrachten van het deurportaal in het vlak van de gevel op te vangen. Hiervoor kan het nodig zijn dat de fundering verbreed wordt (extra palen). Aansluitingen van de infrastructuur moeten herzien worden.
- Om het stalen frame moet een goede thermische isolatie worden aangebracht, zodat warmtelekken door de ontstane thermische brug voorkomen worden. Buitenom dient het duurzaam weersbestendig te zijn.

- Als het doorzonraam aan de voorzijde strak aansluit aan de deur zal dat raam na de versterking smaller uitgevoerd moeten worden. Er kan dan een nieuw hoog-isolerend kozijn met triple glas worden toegepast.
- Omdat het deurportaalframe de gevel ter plaatse naar voren doet komen, kan van die constructie ook gebruik gemaakt worden om een tochtportaal of portiek aan te brengen, of om op de eerste etage meer woonruimte te creëren zoals een uitbreiding van de badkamer.

Figuur 6-68. Voorbeeld van verduurzaming met uitbreiding van de badkamer.

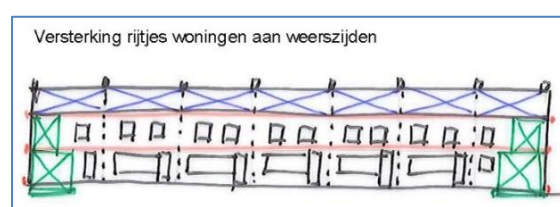
Oude badkamers zijn vaak krap bemeten en het aanbrengen van 15 cm binnenzijdige muurisolatie is dan niet mogelijk. Met een uitbreiding van 0,5 m kan meteen ook die badkamer een betere indeling krijgen.



6.10.f. Versterkte aanbouw aan het gebouw.

Bij rijtjeswoningen in Nederland zijn meestal drie problemen tegelijkertijd aanwezig die in een aardbevingsgebied moeten worden voorkomen of opgelost:

- Rijtjeswoningen zijn slechts ontworpen op stormbelasting, waardoor er in de lengterichting onvoldoende sterkte is om de horizontale massaversnelling van het hele blok te weerstaan.
- Er is onvoldoende sterkte in de lengterichting van het gebouw door grote ramen in de gevels. De begane grond etage is in een dergelijk geval een zachte etage (*soft storey*).¹⁹
- De lengte van het gebouwblok (alle woningen naast elkaar) is meestal > 4x de breedte van het gebouw of de diepte van de woning. Dit is in een aardbevingsgebied een onregelmatige in de plattegrond, waarbij een verdere verlenging voorkomen moet worden.²⁰



Figuren 6-69. Rijtjeswoningen zijn meestal slechts op windbelasting berekend. Door de uiteinden te versterken kan dit probleem worden opgelost.

Wanneer de plattegrond onregelmatigheid niet te groot is ($L : b < 4$) ligt, kunnen de twee buitenste woningen worden omgebouwd als steunwoningen²¹. Behalve de plaatsing van nieuwe ramen in de kopgevels kunnen ook de twee een-na-buitenste woningen gedeeltelijk bij de verbouwde buitenste woningen getrokken worden om een paar extra royale woningen te creëren. Bij kleine blokken of 2-onder-1-kap, waar naast de woningen schuren of garages aanwezig zijn kan de buiten aangebouwde constructie over deze aanbouwen gerealiseerd worden.

¹⁹ De Eurocode 8 en de NPR geven aan dat wanneer het verschil in stijfheid met de bovenliggende etage meer dan 70% is er sprake is van verticale onregelmatigheid. Geen momentsterke muur-vloer verbindingen.

²⁰ Zoals in het hoofdstuk funderingen is toegelicht kunnen hierdoor verticale scheuren in de gevels ontstaan.

²¹ Een rijtjeswoning is 5 tot 6 m breed en 8 tot 10 m diep. Bij 7 woningen is het bouwblok dan onregelmatig.

Figuren 6-70. Versterkte aanbouw bij kleine woningblokken zonder aanpassing gevels. Doorkoppeling van het diafragma is wel nodig (voorkom contactgeluid).



Rechts. In dit geval kan de schuur of garage vervangen worden door een sterke uitbreiding.

Bij flatgebouwen zijn de trappenhuis vaak in de twee uiteinden van het woningblok gelegen en zijn al ontworpen als een stabiliserende constructie.

Figuur 6-71. Trappenhuis geeft versterking aan zijkant. Appartementenblok met trappenhuis geeft stabiliteit aan de rij flats. Onder in het trappenhuis is eveneens de C-ruimte en zijn de afvalcontainers gelegen.

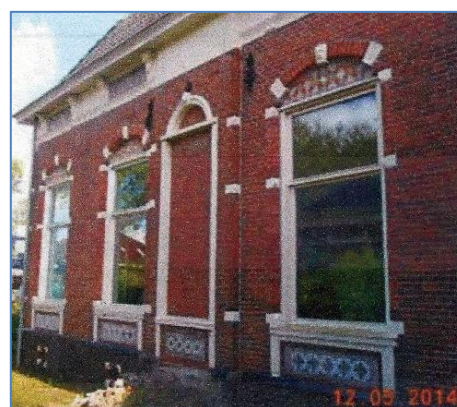


In beide gevallen van een klein woningblok versterken of een rijtje flats, zullen de bewoners, de vereniging van eigenaren (VVE) of de woningcorporatie moeten overleggen met een architect en constructeur hoe de horizontale koppeling van het diafragma tot stand moet komen. Bij een doorkoppeling van het diafragma kan het probleem van contactgeluid een bepalende factor worden.

6.10.g. Dichtmetselen van een of meerdere ramen.

De sterkte van de gezamenlijke penanten op de begane grond etage is bepalend voor de sterkte van het gebouw tegen horizontale belastingen. Door bredere en sterke muurschijven te ontwikkelen zal de sterkte van het gebouw tegen scheurvorming verbeterd worden.

Figuur 6-72. Impressie van een dichtgemetseld raam of deur. Omdat de muurschijf in het midden nu breed is, kan deze een grotere belastingen in het vlak van de muur opnemen dan de smallere penanten tussen de ramen. Door dit symmetrisch in het gebouw toe te passen wordt een sterk geheel verkregen.



Figuur 6-73. Hoekraam op etage dichtgemetseld. Naast het trappenhuis, wordt op de etage een verbeterde sterkte verkregen. Het trappenhuis onderbreekt namelijk het vloerdiafragma. Een sterk glaspaneel dat strak in het kozijn zit heeft hetzelfde versterkende effect en brengt licht in de woning.



6.10.h. Plaatsen van sterke constructieve isolerende glaspanelen.

Deze methode is geïnspireerd op de moderne toepassing van glasvlies gevels, waarbij de gelaagde, geharde ruiten een zeer hoge drukweerstand hebben en op grote sterkte zijn berekend. Het gaat over gehard (gestabiliseerd) gelaagd glas. Dit kan ook dubbel (isolierend) worden uitgevoerd.²² Ook in de sterkte loodrecht op het vlak van het glas zijn deze ruiten vele malen sterker dan gewoon vensterglas. Voorbeelden van in Nederland gebouwde projecten.²³



Figuren 6-74. Grote projecten met sterke constructieve ruiten. De ruiten in deze voorbeelden kunnen zeer grote (wind, thermische) belastingen opnemen.

Rechtsboven. In de zigzag gevel van het EMC, Rotterdam (prj.nr. 6540) werden de ruiten ook op statische gebouw belastingen berekend. *Rechts.* Dikke constructieve panelen kunnen ook als dragende ligger worden toegepast.



Veiligheidsglas, kogelwerend glas en gelamineerd hardglas zijn varianten van constructief belastbare en stabiliserende glaspanelen die grote belastingen kunnen opnemen. Gehard (volksnaam voor thermisch voorgespannen) gelaagd heeft b.v. een dikte van 9 of 11 mm (4.1.4 mm ofwel 5.1.5 mm) en bestaat uit twee geharde glaspanelen die met een PVB-tussenfolie in de fabriek op elkaar zijn gesmolten (onder 150 graden Celsius).

Constructief glas brengt de kosten van het verstijven en versterken van openingen sterk omlaag, met name muren die smalle penanten hebben. Een thermisch voorgespannen glasplaat of -glaspaneel is ongeveer 5x zo sterk als gewoon floatglas.

Door twee gelamineerde glaspanelen als een isolatiepaneel op te bouwen (met 16 mm luchtsponw ertussen en Argon gasvulling) en aan de binnenzijde op zijde 3 een Low-e coating aan te brengen, hebben deze ruiten een U-waarde van $HR^{++} < 1,2 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ (isolatiewaarde is $R_g > 0,83 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$).

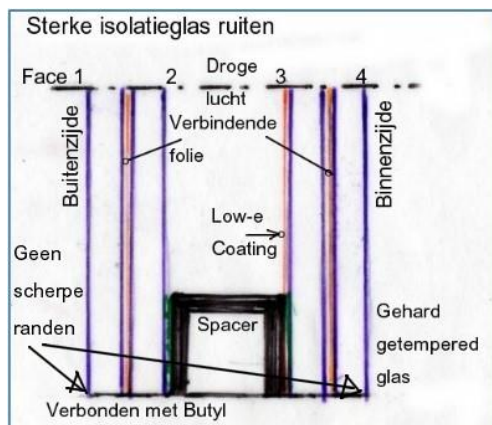
Het geharde en gelamineerde dubbelglas isolatiepaneel heeft daarmee een sterkte die minstens 20 x tot 30 x groter is dan een enkele 4 mm of 5 mm glasplaat, en kan daarom grote belastingen in het vlak van de ruit opnemen én loodrecht op het vlak van de ruit. De aardbevingsbelastingen kunnen dan via een groot oppervlak lopen (nl. twee penanten en een glaspaneel ertussenin).

Om te zorgen dat het constructieve glaspaneel ook daadwerkelijk de belastingen van het gebouw overneemt zijn de volgende voorwaarden van toepassing:

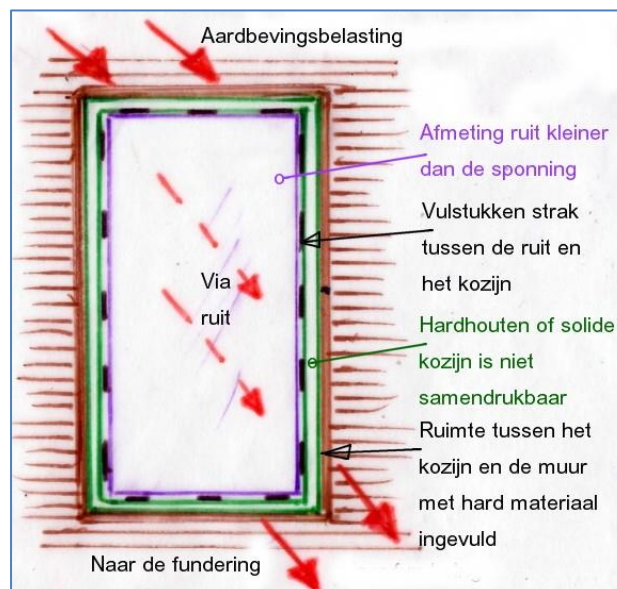
²² Er zijn aluminium kozijnen beschikbaar die een glas pakket van 81 mm kunnen hebben.

²³ Afbeeldingen van https://www.octatube.nl/en_GB/projects.html met toestemming van Mick Eekhout. Een van de projecten werd in Mexico City uitgevoerd (Moda in Casa); dit is een tektonisch aardbevingsgebied.

1. Het glaspaneel heeft een dikte van 5.1.5 - 16 - :5.1.5 mm totaal 38 mm en bestaat uit twee bladen gelamineerd-gehard glas met een luchtspouw van 16 mm.²⁴
2. Het kozijn moet in een steens muur zitten. Dit is de meest voorkomende situatie bij oude gebouwen. Bij spouwmuren moet bekeken worden in hoeverre het glas in de druklijn zit.



Figuren 6-75. Doorsnede detail van een gelamineerd en isolerend glaspaneel. Voor lichte woningen is dit meestal sterk genoeg.

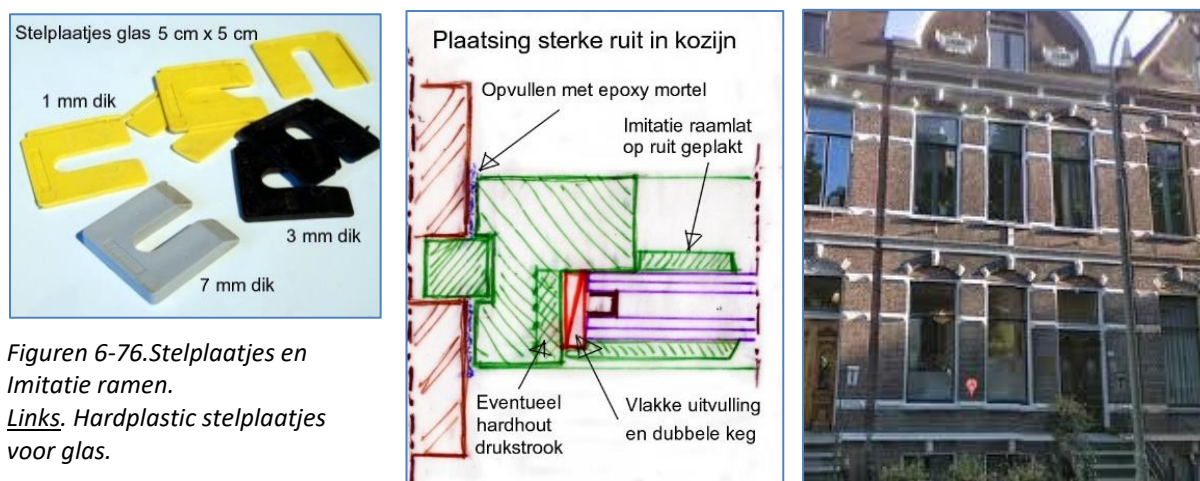


3. De randen zijn standaard geslepen om randbeschadiging bij het handelen te voorkomen. Als gehard glas een randbeschadiging krijgt kan de hele ruit barsten c.q. verkrummen. Een geharde glasplaat mag daarom ook geen contact maken met metalen onderdelen.
4. De glasplaat mag NIET in een beweegbaar houten raamwerk gezet worden, maar moet direct in de vaste kozijnspinning geplaatst worden, aannemende dat het houten kozijn met ankers goed verankerd is aan het metselwerk. Om het aanzicht van een kozijn met een raamwerk te behouden (bij monumenten) kan een prefab geschilderde hardhouten lat op het glas gelijmd worden, aan binnen- zowel als buitenzijde om glas achteraanzicht te vermijden. Deze latten kunnen in de kleur van het vroegere raamwerk geschilderd worden.
5. Het constructieve, stabiliserende glaspaneel moet na plaatsing in de druklijn tussen de draagmuren van het gebouw zitten die de aardbevingsbelasting zullen ondergaan.²⁵
6. Het glaspaneel wordt met een ruimte van ongeveer 3 mm in de sponning ingemeten. Die ruimte wordt bij het stellen ingevuld met **vlakke** hardplastic of nylon stelplaatjes (tenminste 15 cm lang) zodat het glaspaneel **zeer strak** in het kozijn komt te zitten. Opvulstroken (niet zichtbaar kunnen ook in POM uitgevoerd worden. Daarna invullen met verhardende epoxy.
7. De stelstroken moeten strak in de hoeken zitten. De hoekstroken zijn belangrijk vanwege de diagonaal optredende schuifspanningen. Hoe hoger het glas, hoe langer de hoekstroken moeten zijn. De stelstroken moeten overal vlak in de sponning de glaspanelen volledig steunen.
8. De stelstroken kunnen aan één zijde vlak tussen glas en kozijn geplaatst en aan de tegenovergestelde zijde (onder of boven) als **dubbele wiggen** worden toegepast. Enkele stelwiggen zijn niet goed, want de spanning komt dan slechts op één gelamineerd glaspaneel i.p.v. op beide panelen van het samengestelde isolatiepaneel.
9. Kunststof kozijnen zijn meestal in de sponning samendrukbaar vanwege de vele luchtkamers; die kan men dus niet gebruiken.

²⁴ De sponning van oude kozijnen varieert van 35 tot 40 mm. Met de constructieve sterke ruit i.p.v. het raam past het precies. Het kozijn kan ook dikker gemaakt worden zodat er een bredere sponning ontstaat.

²⁵ Bij een dragend binnen spouwblad moet het constructieve glaspaneel dan tussen die spouwbladen zitten. De kozijnspinning moet soms worden aangepast (of het kozijn verbreed) als dat niet het geval is.

10. Het kozijn moet van een goede kwaliteit hout zijn, of er moet een nieuw kozijn worden gesteld²⁶.
11. Aandacht is nodig voor de onderdorpel, omdat deze bij oude woningen vaak houtrot vertonen; het vervangen van de onderdorpel door een hardhout exemplaar is dan noodzakelijk.
12. Het kozijn moet **zeer strak** in de muurspanning zitten en in het centrum van de druklijn van de gemetselde (spouw)muurbladen aanzitten. Afhankelijk van de bewegingstolerantie of elasticiteit van de draagmuren of de rest van de constructie, kan de kier tussen het kozijn en het metselwerk worden opgevuld met een niet samendrukbaar volledig verhardende epoxymortel.
13. Afhankelijk van de plattegrond van het gebouw moet bij de toepassing zorggedragen worden voor een symmetrische versterking. Dit zal speciaal het geval zijn bij stadswoningen.



Figuren 6-76. Stelplaatjes en Imitatie ramen.

Links. Hardplastic stelplaatjes voor glas.

Midden: Om het vroegere aanzicht van de oude ramen te behouden kan op het vaste glaspaneel een imitatiestrook gelijmd worden en in de kleur van het vroegere raam geschilderd.

De toepassing van constructieve glaspanelen heeft meerdere toepassingen:

- A. In oude gebouwen met steens-muren en hoge raampartijen, gecombineerd met smalle penanten.
- B. Oude woningen met hoge ramen en veel ramen in de gevel.
- C. Woningen met veel ramen in de gevel en gebrek aan binnenmuren.
- D. Woningen waar het versterken van binnenmuren extra overlast veroorzaakt.
- E. Rijtjeswoningen met weinig raampenanten in de gevels.
- F. Bij doorzonwoningen (zelfde als F).

Figuren 6-77. Dik isolatieglas met opklappen i.p.v. een raam. Voorbeeld van een dikke ruit in een oud kozijn die in de sponning van het kozijn is gesteld. Het glas is afgewerkt met opgeplakte glaslatten die de indruk wekken dat er ook nog een raam zit. Bij een afstand van meer dan 1 meter is het verschil met een origineel raam niet te zien.



²⁶ De hardplastic of nylon of POM-involstroken zullen de druk op het hout concentreren, vooral in de binnenhoeken van het kozijn. Als het houten kozijn wel goed is maar onvoldoende hard, kan een hardhouten lat in de sponning worden gezet. Het uit-fresen van de sponning is geen goede optie.

Een voorbeeld van mogelijke toepassing is het veel gefotografeerde gemeenschapshuis in Leermens dat vanwege de smalle raampenanten (steens muren) en gebrek aan lateien en zonder bovenliggend vloerdiafragma als risicovol werd beschouwd en jarenlang in de steigers heeft gestaan.

Door in tenminste in elke gevel één kozijn in de kopgevel een stabiliserend constructief glaspaneel te plaatsen krijgt het hoekpenant opeens een verhouding breedte/hogte van $5/6 = 0,83$ (i.p.v. $0,22$) en is daarmee voldoende sterk voor hoge schuifspanningen in het vlak van de gevel.



Figuren 6-78. Optie sterke glaspanelen voor gemeenschapshuis Leermens. De raam- en terrasdeur penanten (rood) hebben ongeveer een breedte/hogte verhouding van $1/4,5 = 0,22$ en zijn voor een PGAg $0,1$ te zwak. Aan de zijkant is het niet beter. De paarse omlijsting geeft de locatie van het glaspaneel aan.

Het sterke constructieve glaspaneel (paars kader) en twee smalle gemetselde penanten samen (groen kader) werken voldoende samen om de stabiliteit in het vlak van de gevel te realiseren. Het overblijvende smalle penant (rood) verliest hiermee haar sterktefunctie en is niet meer kritisch. De nodige rondgaande lateiwapening is lichtblauw aangegeven. Afhankelijk van de algemene constructie van het gebouw zal er een zoldervloer diafragma moeten worden aangelegd. Wanneer de terrasdeur vervalt kan hier ook een constructief glaspaneel geplaatst worden, waardoor er geen (verkeerde) asymmetrie in de krachtenverdeling ontstaat.

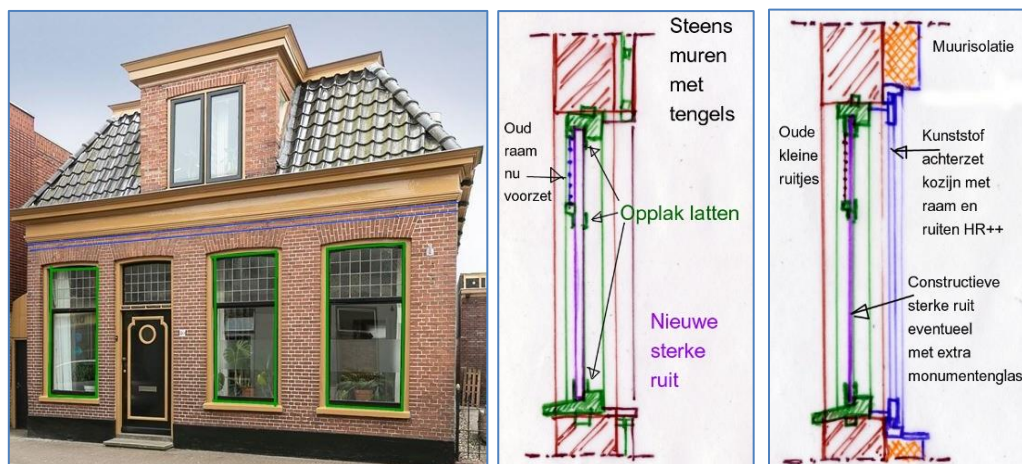
Hetzelfde moet gebeuren met de raamkozijnen (enkel glas) en in de zijkanten om het hele gebouw aardbevingsresistent te maken, als het aanbrengen van een doorgaande wapening boven de ramen en een vloerdiafragma (lichtblauwe lijnen).

Oude woningen hebben in de hoge kozijnen in de bovenzijde een ventilatieraam zitten met kleine ruitjes of soms glas-in-lood die gedeeltelijk doorzichtig zijn (kathedraalglas). In sommige situaties zijn de bovengedeeltes scharnierend, open te zetten of een schuifraam. In de situatie van een gevelversterking met constructieve glaspanelen zal het klepraam, die open-zetbaarheid of de schuifraamfunctie vervallen. Om hetzelfde beeld als vroeger terug te krijgen kan het oude raam met de kleine ruitjes buiten als extra voorzetraam worden toegepast. Door de toepassing van decentrale ventilatie met WTW kan goed en energiezuinig geventileerd worden.

Als optie kan er een enkele, massieve sterke constructieve ruit in het bestaande kozijn worden gezet, waarbij aan de binnenzijde een open te zetten achterzetraam van HR⁺⁺ isolatieglas komt. Hiermee wordt de totale isolatiewaarde flink verhoogd en kan het constructieve paneel vanuit de binnenzijde schoongehouden worden.

Wanneer de oude ruit historisch glas is (monument) kan het constructieve paneel aan de buitenkant gelamineerd worden met een extra glasplaat van monumentenglas.²⁷ Er zijn verschillende constructie situaties, die per situatie bekeken moeten worden om een mooie oplossing te maken.

Figuren 6-79. Toepassing van constructief glaspaneel. Het groene kader bij een oude woning met bovenramen van kleine ruitjes.



Naast het versterken van de gevel moet er ook een horizontaal verband boven de ramen worden aangebracht (blauwe lijn) en een zolder vloerdiafragma. Dit kan ook achter het houten boeiboord.

Kozijnen kunnen in haar geheel vervangen worden door metalen kozijnen die de belasting goed op de glaspanelen kunnen overdragen. In de meeste situaties zal een geheel nieuwe gevel hier de voorkeur hebben.²⁸ De kamers moeten wel goed geventileerd kunnen worden. Bij het aanleggen van een nieuwe gevel zal naast het constructiedetail ook de thermische isolatie en de woningventilatie moeten worden bestudeerd en aangepast.

Figuur 6-80. Vervangen van een hele pui met constructief glas. Bij doorzonwoningen is de methode van aanbrengen van constructieve glaspanelen afhankelijk van andere constructie details. In het geval van deze woning moet de borstwering óók versterkt worden om de krachten naar de fundering over te brengen. Daar moet dan wel een fundering zitten!! Ook op de etage moeten maatregelen genomen worden.



6.10.i. Diagonalen in en voor de raamopening en buitenom, exo-skelet.

Bouwkundig gesproken is het een logisch ontwerp om in de raamopeningen druk- of trekdiagonalen toe te passen om de krachten in het vlak van de muur van het gebouw op de fundering over te dragen. Echter in de woningbouw dit is geen courante oplossing, maar wel in kantoren en andere utiliteitsgebouwen. Een gebouw met een houten of stalen frame kan vóór de ramen of muren diagonale spankabels hebben die de horizontale stabiliteit verzekeren. Bij commerciële gebouwen, moderne agrarische schuren, scholen en kantoren zijn dit goede versterkingsopties.

²⁷ Bij deze optie hoeft er geen Low-e coating op de ruit te worden aangebracht.

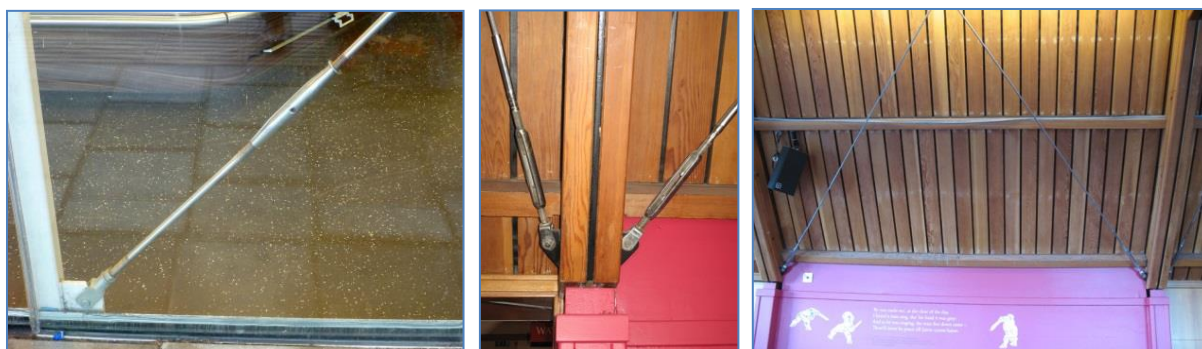
²⁸ Omdat hier verschillende aspecten een rol spelen en deze woningen meestal van woningcorporaties of VvE zijn, worden de opties hier niet in detail uitgewerkt. De woningventilatie is een van die aspecten. Woningcorporaties of VvE kunnen contact met mij opnemen voor de uitwerking van de opties.

*Figuur 6-81. Gerenoveerd gebouw met raam diagonalen. Dit vroeg 19^{de}-eeuwse gebouw werd gerenoveerd en als **kantoorgebouw** in gebruik genomen. Om voldoende stevigheid in het vlak van de muren te creëren werden in de raamopeningen verschillende diagonalen gebouwd die de trek en druk in de gevel opvangen.*

Sterke constructieve isolerende glaspanelen in alle kozijnen bij een laag gebouw kan goedkoper zijn.



De toepassing van diagonaal versterking is ook een goede optie om de oude grote houten gebintenschuren te stabiliseren en de flexibiliteit te verminderen. Bij deze houten schuren moet dan ook de fundering onder de gebinten verbreed worden zodat er voldoende draagkracht is.



Figuren 6-82. Diagonale spankabels aan metalen en houten frame. Hier zijn er niet-stijve invulpanelen.

Analoog aan de voorgaande oplossingen kan ook een diagonalen-frame om het gebouw gemaakt worden. Sommige gebouwen worden met diagonalen een exo-skelet ontworpen.

Figuur 6-83. Impressie van een exo-skelet om een gebouw. Links. Geen echt exo-skelet, maar het geeft wel de indruk. Met de vloerdiafragma's vormt het een stabiel geheel. Bij een exo-skelet veranderd de gevel sterk van aanzien.



6.10.j. Nieuwe sterke en geïsoleerde buitengevel.

Er zijn meerdere redenen waarom buitenzijdig seismisch versterken de voorkeur heeft boven binnenzijdig versterken. Dit heeft vooral te maken met de noodzaak de gebouwen tegelijkertijd te verduurzamen en daarvoor de thermische schilisolatie in haar geheel te verbeteren. De versterking is in grote delen analoog aan deze isolatieproblematiek.²⁹

²⁹ In het document: "Gevelisolatie. Inclusief DUNNE Binnenzijdige isolatie", worden de verschillen tussen binnenzijdige en buitenzijdige isolatie in detail behandeld. website www.nienhuys.info eerste pagina.

- ✓ Minder veranderingen aan de binnenzijde. Het versterken van de buitengevel van gebouwen heeft de voorkeur wanneer de versterking aan de binnenzijde en het terugbrengen in de oude staat kostbaar is. Er kan minder sloop- of breekwerk en minder bouwafval het gevolg zijn. Het is dan niet noodzakelijk om radiatoren en binnenleidingen te veranderen.

Figuur 6-84. Bij dit gebouw moet het houten vloerdiafragma verstijfd worden.

Bij veel monumenten zal de buitenkant van het gebouw beeldbepalend zijn en kan/mag men de buitengevel niet wijzigen. Wanneer noch het interieur, noch de buitengevel mag worden aangepast is 'Base-isolation' de optie.

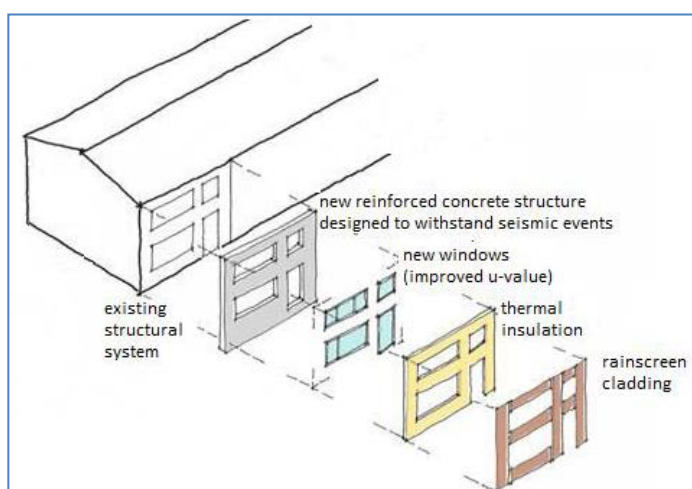


- ✓ De bewoners in het gebouw blijven wonen. Dit heeft het logistieke, financiële en sociale voordeel dat er geen verhuizing nodig is met tijdelijke opslag van het huisraad, verhuiskosten en tijdelijke bewoning in een andere locatie. Hoe langer de bouwperiode duurt, hoe hoger de relocatiekosten zullen zijn. Wanneer alleen de buitenkant wordt behandeld, kan de procestijd zonder extra relocatiekosten worden verlengd.

Figuren 6-85. Buitenzijdige versterking en verduurzaming. Voorbeeld van aanpassing van de gevel terwijl de bewoners in het gebouw verblijven. Deze methode is zinvol voor woningbouwcorporaties waar grote series woningen moeten worden verduurzaamd.



Figuur 6-86. Plaatsing van een nieuwe sterke en geïsoleerde gevel. Deze schets is een impressie van Arup (2013). Bij woningwetwoningen zal het (15 cm dik) isoleren aan de binnenzijde tot te veel ruimteverlies leiden. In bijna alle opties is het buitenzijdig isoleren een meer economische oplossing dan binnenzijdig.



- ✓ Eenvoudiger werken voor aannemer, waardoor de kosten laag blijven. De aanleg van funderingen aan de buitenzijde is aanzienlijk eenvoudiger en sneller dan onder een gebouw

een fundering versterken. Aan de buitenkant kunnen eenvoudig paalfunderingen worden toegevoegd met trillingvrije perspalen.

- ✓ Het gebruik van een hijskraan is sneller werken en heeft daarom invloed op de verbouwkosten. Prefabricage van elementen in een werkplaats en seriematig werken aan een bouwblok of hele straat heeft ook invloed op de verbouwkosten.
- ✓ Massa vermindering. Bij het verwijderen van bakstenen gevels en het terugplaatsen van sterkere lichtgewichtgevels, wordt de massa van het gebouw verminderd. Wanneer de gevel hoofdzakelijk uit ramen bestaat, zal het verschil echter weinig uitmaken. Voor gebouwen met zware gewapend betonnen (systeem)vloeren zal het percentage massaverschil zeer klein zijn.

Figuur 6-87. Het verminderen van de massa is een relatieve versterking van het gebouw. Dit is een basisregel van seismisch versterken.



- ✓ Metalen frame of portaal buiten op een nieuwe fundering. Dit is relevant als er in de begane grond van die gevel geen muurvlakken aanwezig zijn die uitwendig versterkt kunnen worden. Dit is vaak het geval met doorzonwoningen, maar ook bij andere gebouwen die aan een kant grote raamopeningen hebben. Het frame moet een eigen fundering hebben.

Figuur 6-88. Een metalen frame op een eigen fundering. De 'ligger' achter de borstwering op de eerste etage is momentsterk en vormt een portaal met de verticale delen van het frame. Er vervalt hier dan een smal gevelraam.

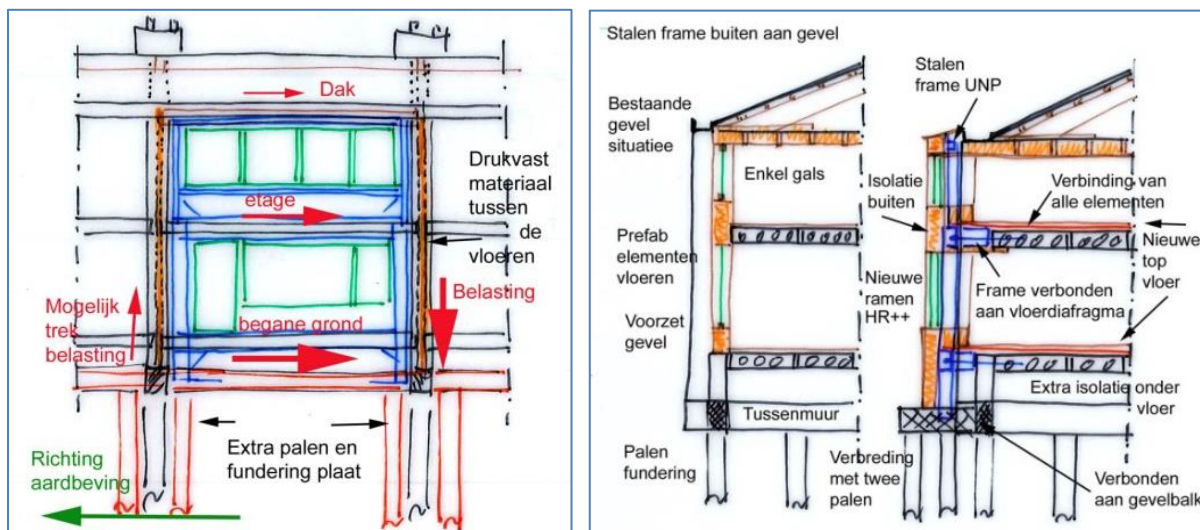


Bij deze optie zijn er enkele voorwaarden:

- De etagevloer moet als een geheel stijf zijn en aan de woning-scheidende muren verbonden zijn.
- De twee liggers aan de voor- en achterzijde van de woning moeten sterk aan de etagevloer worden verbonden om de horizontale krachten van de vloer over te brengen op de portalen.
- Het portaal brengt aan beide zijden van de woning de krachten over naar de fundering.
- De fundering onder de portaalpoten moet extra versterkt worden.
- De constructie op de eerste etage kan licht blijven als de kapconstructie van hout is.
- De voorgeschreven isolatie wordt aan de buitenzijde van het frame toegepast.
- De bewoner kan in de woning verblijven.
- Bij sterke frames, kunnen slechts de buitenste woningen van een rijtje versterkt worden. Om de frames licht van constructie en gewicht te houden en alle woningen dezelfde nieuwe en geïsoleerde gevel te geven, kan twee lichte frames per woning meer economisch zijn.
- Bij slechts een enkele set voor- en achterzijde frames in één rijtje woningen is het essentieel dat de vloeren druk-vast en trek-vast door-gekoppeld zijn. Dit kan contactgeluid overlast geven. Bovendien bestaat dan de mogelijkheid dat er bij een set palen trekkrachten ontstaan.

Een goede thermische isolatie aan de buitenkant zal minder warmtelekken opleveren dan binnenzijdige isolatie. De constructiedetails moeten rekening houden met de bouwfysische

materiaaleigenschappen en de veranderde vochtuithouding en ventilatie wanneer er nieuwe gevels worden geplaatst die kierdicht en meer isolerend zijn.



Figuren 6-89. Constructieve voorwaarden bij versterking gevel.

Bij weinig portalen en hoge belastingen bestaat er de mogelijkheid dat er trek op de palen kan ontstaan.

Bij woningen met dragende steens buitenmuren, waarbij de kwaliteit van het metselwerk aan de buitengevel niet beeldbepalend is, kan over die buitenmuur een sterke GVTW³⁰ worden aangebracht in een pleisterlaag, en daaroverheen een thermische isolatie, en daaroverheen steen-strips³¹.

Figuren 6-90.
Baksteen gevel
maar geen
monument.
Rechts. Steenstrips
op EPS-isolatie
(Crepì) dikte 15
cm.



Het EPS-isolatiemateriaal heeft voorgevormde ribbels waar de steen-strips ingedrukt kunnen worden. Wanneer het buitenblad van de spouwmuur wordt verwijderd is de nieuwe voorzet muur met isolatie lichter en ongeveer even dik.

Zonder het verwijderen van het buitenspouwblad zal het gewicht van de gevel toenemen en is aanpassing van de fundering wellicht nodig. Door de toepassing van Crepi (met pleisterwerk) of steen-strips blijft de gewichtstoename beperkt.



³⁰ In combinatie met cementmortel dient het type Alkali Resistent (AR) GVTW te worden toegepast, terwijl volgens de bouwcode dan met slechts met 50% van de treksterkte kan worden gerekend.

³¹ Steen-strips kunnen in vele kleuren geleverd worden, in verschillende diktes en materiaal kwaliteiten.

De mogelijke afwerking met pleisterwerk, GVTW, isolatie en steen-strippen is niet alleen voor het type rentenierswoning mogelijk, maar ook voor andere woningtypen die relatief licht van constructie zijn en voldoende muuropervlak hebben om te versterken. Bij smalle muurpenanten en grote ramen werkt de GVTW-methode niet zonder additionele maatregelen.

Bij in baksteen gemetselde gevels zijn er veel schades aan en rondom de lateien te zien. Een groot gedeelte hiervan is verergerd gedurende de aardbevingen in de afgelopen jaren. Door de gehele buitenschil te verwijderen en opnieuw aan te brengen met een versterkte laag, isolatie en steenstrippen zijn meteen ook deze schades verdwenen.

Voor seismische versterking van grote gebouwen wordt soms spuitbeton (*shotcrete*) toegepast, waarmee een gewapend betonnen laag van 5-6 cm dik op een bestaande muur wordt 'geplakt'. Vanwege de lage bevestigingsbelasting en deze zware maatregel wordt dit product niet toegelicht.

Figuur 6-91. De toepassing van spuitbeton. Deze optie is erg zwaar, maar kan ook heel sterk zijn. Voor de lichte aardbevingsbelasting in Groningen wordt dit niet overwogen voor de woningbouw.



6.11. Muurherstel en versterking met rvs-spiraalwapening (wokkels)

Binnen- en buitenmuren kunnen structureel hersteld of versterkt worden door het inplakken van spiraalwapening. De techniek is beschreven voor de binnenmuren. Verschillende bedrijven bieden muurherstel aan met deze methode.³² Via deze websites kunnen ook verschillende links naar YouTube filmpjes worden gemaakt, waarin de toepassing en werking van dit product wordt toegelicht. Seismisch versterken gaat echter verder dan alleen muurherstel.

Voor versterkte ringbalkconstructies of doorgaande lateien, kan de spiraalwapening in elke lintvoeg worden toegepast. Per lintvoeg kunnen zelfs twee rvs-wokkels in de diepte van de voeg naast elkaar worden toegepast. De buitendiameter van de spiraalwapening moet kleiner zijn dan de voegdikte, en de wokkels moeten rondom goed in de voeglijm zijn ingepakt. Ook kunnen buitenmuren met spiraalankers aan binnenmuren gekoppeld worden of de balken aan de muren.

Sinds 2012 werd deze methode van muurherstel ('schadeherstel') door vele kleine aannemers in de provincie Groningen ontoereikend en **zelfs verkeerd toegepast** door te bezuinigen op de lengte, door de wapening nooit om de hoeken door te zetten, of om de binnenmuren niet aan de buitenmuren te verbinden. Hierdoor werd geen seismische versterking verkregen en onstonden er twee situaties:

- ⊗ Langs het uiteinden van de spiraalwapening ontstaan bij een schok nieuwe scheuren, en
- ⊗ Muren die haaks op elkaar staan hebben geen treksterke verbinding en kunnen bij een nieuwe schok over de hele hoogte van elkaar losscheuren.

³² Helifix, <https://www.helifix.nl/uploads/pdfs/downloads/HeliBar.pdf> Thorhelical, <https://www.thorhelical.nl/scheurherstel/> Total Wall, <https://www.totalwall.nl/nieuws/een-wokkel-als-metselwerkwapening.html> ABC Adamas, <https://www.abcadamas.nl/scheurherstel>. Reconex, <https://www.reconex.nl/RVS-wapening>, <https://www.voegrenovatie.nl/nl/scheurherstel-aardbevingschade-spiraalanker>



Figuur 6-92. Voorbeeld van een verkeerde toepassing van spiraalanker. Zowel boven het linker als rechter raam lopen de ingeslepen voegen of ankers niet door. Tussen die wapeningeinden zal de muur opnieuw scheuren.

Naast de beperkte uitvoering in buitenmuren (herstel i.p.v. versterking) kwam het veel voor dat er wel wikkels in de buitenmuren werden toegepast, maar niet in de gescheurde binnenmuren boven de deuren of ramen, ter versterking van de lateifunctie. Tenslotte werden de binnenmuren ook niet aan de buitenmuren of de vloeren gekoppeld, iets wat wel noodzakelijk is in een aardbevingsgebied.

Figuren 6-93. Wegwerken is geen seismische versterking. Door bij binnenmuren slechts de scheur weg te plamuren, zonder muurversterking, ontstaat er bij de eerst volgende schok weer een barst.

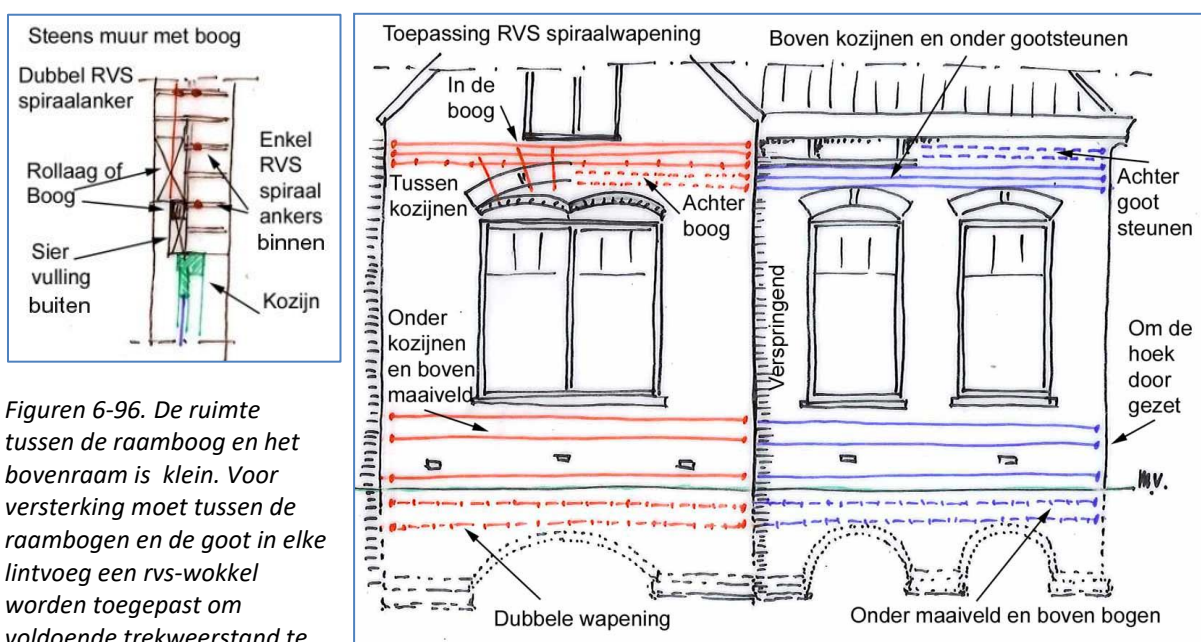


Muurversterking met rvs-spiraalwapening moet doorlopend over de gehele muurbreedte en rondom de hoeken van het gebouw aangebracht. Door de rvs-wapening om de hoeken door te zetten ontstaat er een verbinding tussen de haaks op elkaar staande buitenmuren.

Figuur 6-94. Voltooid werk met niet-doorlopende rvs-wapening. In het midden is een onderbreking van de horizontale staaf van slechts enkele cm. Hier kan het gebouw dan opnieuw scheuren.



Figuur 6-95. Op verschillende plaatsen niet om de hoek aangebracht. Toepassing slechts boven enkele lateihoeken, hetgeen tot nieuwe scheuren ernaast zal leiden. Hier is slechts sprake van muurherstel, niet van enige vorm van seismisch versterken.

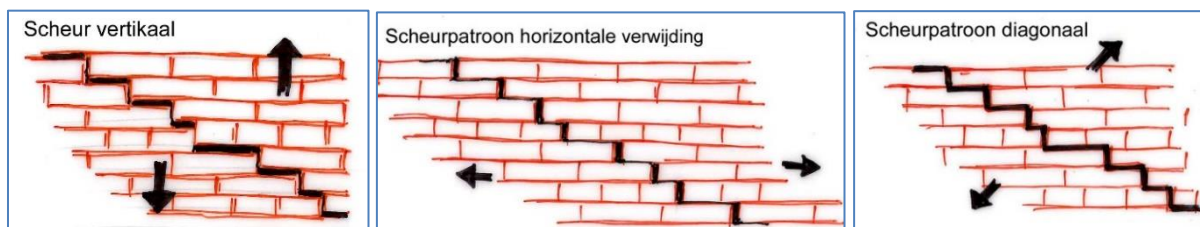


Figuren 6-96. De ruimte tussen de raamboog en het bovenraam is klein. Voor versterking moet tussen de raambogen en de goot in elke lintvoeg een rvs-wokkel worden toegepast om voldoende trekweerstand te kunnen ontwikkelen in de bovenkant van het gebouw en verbinding met het vloerdiagrama te maken.

Figuren 6-97. Gevel versterkingen. Bij scheuren in de gevels is spiraalwapening vaak onvoldoende en moet er ook een verbetering van de draagkracht van de fundering plaatsvinden. Rechts. De lintvoeg wapening is na het schilderen nog wel zichtbaar.



Bakstenen muren raken verzwakt door scheuren. Een haarscheur maakt weinig uit voor de druksterkte, maar geeft aan dat er ZERO treksterkte in die muur bestaat.³³ Hoe groter de scheur, hoe zwakker het metselwerk. De geheel horizontale lintvoegscheur ontstaat vaak bij penanten en kan niet versterkt worden met spiraalwapening in de lintvoegen. Diagonale en verticale metselwerk scheuren kunnen wel met spiraalwapening gestabiliseerd worden. Bij het in de lengte doortrekken van de wapening in meerdere lintvoegen wordt de muur versterkt.



Figuren 6-98. Drie typen scheuren in baksteen muren. Links. Horizontale verwijding ontstaat vaak boven ramen vanwege gebrek aan horizontale verbinding (niet doorlopende lateien). Midden. Verticale verwijding ontstaan vaak door verzakkingen. Rechts. Diagonale verwijding door een combinatie van deze twee.



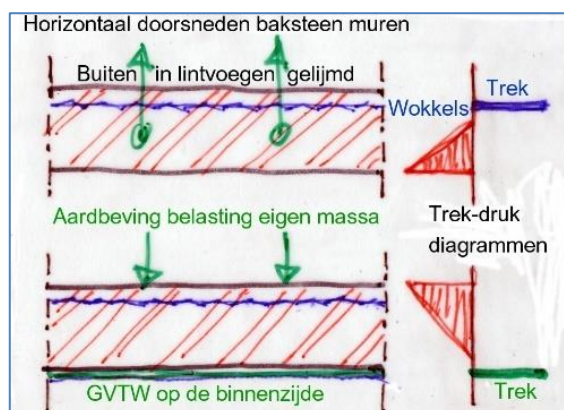
Figuur 6-99. Verticale hoekscheuren in het metselwerk. Zuiver verticale scheuren kunnen vaak ontstaan onder andere door thermische uitzetting en gebrek aan dilatatie, of gebrek aan binding met het vloerdiafragma.

Door het aan de buitenzijde van een bakstenen muur inbrengen van wikkels, wordt aan die buitenkant van de muur treksterkte ingebracht.³⁴ In combinatie met de drukzone van het metselwerk aan de binnenkant, kan deze muur een redelijke belasting opnemen tegen het uitbuiken.

Figuur 6-100. Plaatsing van de wapening en weerstand tegen vervorming.

Door het inlijmen van wikkels wordt de treksterkte in dat oppervlakte van de muur veel groter. De muur kan dan doorbuiging in de richting van de groene pijlen weerstaan.

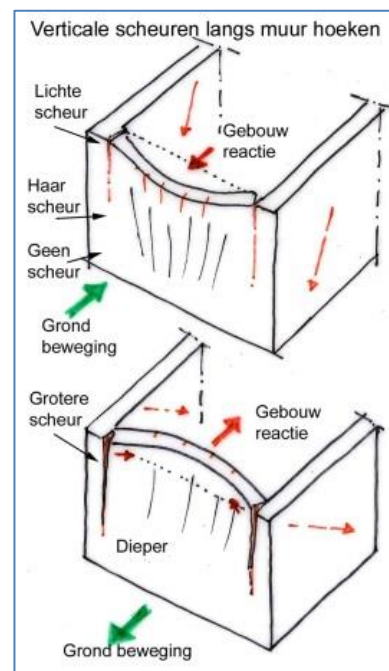
Door aan de binnenzijde GVTW toe te passen kan deze muur ook buiging naar de andere zijde weerstaan.



³³ Baksteen metselwerk wordt niet op trek berekend, maar heeft wel een sterkte tegen afschuiving afhankelijk van de kwaliteit van de mortelvoegen en de breedte van die voegen. Bij verdiepte voegen is dit flink minder.

³⁴ Voor meer informatie over scheuren in oudere gebouwen zie: "Materialen en technieken in historische metselwerkconstructies". https://lib.ugent.be/fulltxt/RUG01/002/367/226/RUG01-002367226_2017_0001_AC.pdf

Figuur 6-101. Ingeplakte wikkels geven treksterkte rondom het gebouw. De schets geeft het gedrag van ongewapende muren weer bij een aardbeving loodrecht op het vlak van deze muur. De muur zal in het midden doorbuigen (uitbuiken), waardoor deze lostrekt van de zijmuren. Verticaal zullen langs de zijkanten dan ook scheuren ontstaan. Door lintvoegwapening in de buitenkant in te lijmen wordt dit uitbuiken en de scheuren voorkomen. Door de wapening om de hoek te laten lopen wordt de verticale scheur voorkomen. Hetzelfde geldt voor het naar binnen buigen. De bovenkanten van de muren moeten echter hoofdzakelijk versterkt en ondersteund worden door een goede verbinding met een stijf vloerdiafragma.



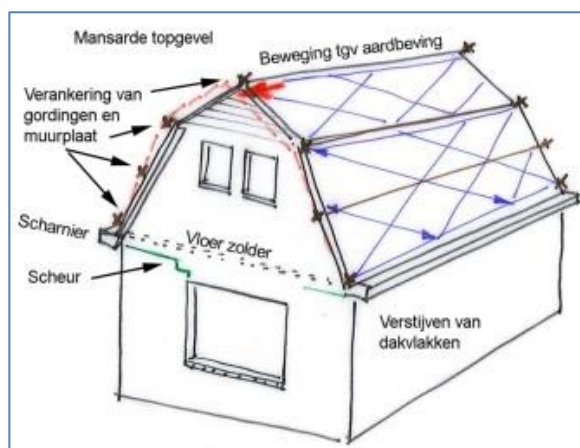
6.12. Verwijdering van de baksteen muur top

Door de massa van de bakstenen muur weg te nemen (de hele topgevel driehoek), zijn er minder aardbevingskrachten op die muren en de onderliggende muren en wordt het gebouw dus relatief sterker. Topgevels zullen door een flexibel houten dakbeschot meer verplaatsing ondervinden dan andere gebouwonderdelen. Dit kan/zal leiden tot scheuren in de basis van die topgevel. Hoe flexibeler de houten dakconstructie, hoe groter de verplaatsing.



Figuren 6-102. Horizontale scheuren t.g.v. geveltop bewegingen. Het Mansardedak heeft een scharnierscheur tussen de goot en het raam. Deze ontstaat door de beweging van het oude houten dak dat eraan verbonden is.

Figuren 6-103. Slappe kapconstructie beweegt de bovenkant van de topgevel. Hierdoor ontstaat er een horizontale breuklijn op de hoogte van de etage vloer. Een houten topgevel is lichter, en kan beter geïsoleerd worden en laat geen scheur zien.



Het getoonde Mansardedak heeft een steens-muur, maar geen bijzondere architectonische waarde. Door het dak te versterken en verstijven kan beweging worden voorkomen, maar ook door de geveltop in geïsoleerde houtbouw uit te voeren. Vele woningen in de provincie hebben dit soort van topgevels.

Bij een verduurzaming van dit soort oude woningen zal ook het dak beter geïsoleerd moeten worden. Wanneer de voorgevel ter plaatse van de zoldervloer wordt vastgezet en de zoldervloer wordt als een stijf diafragma uitgevoerd, is het niet veel extra werk om deze gevel te vervangen door een goed geïsoleerde, bekleed met kunststof, PVC, composiet, metaal of hout. Dit bespaart ook ruimteverlies wanneer er isolatie aan de binnenzijde moet worden toegepast. Het verschil in stijfheid tussen de dakconstructie en de nieuwe gevel is dan niet meer relevant is.

6.13. Kostenaspecten

De besluitvorming over welk muur-versterkingssysteem het beste is wordt hoofdzakelijk bepaald door de kosten van de ingreep:

- A. De kostprijs van de (seismische) versterking. Deze omvat de projectvoorbereiding en uitvoeringskosten door ingenieursbureaus en aannemers en aan de ene kant, en aan de andere kant algemene communicatie, management, monitoring en coördinatie kosten.³⁵
- B. De mogelijkheid om seriematig te werk te gaan heeft een grote kostenreductie.
- C. De tijdsduur van de operatie. Hoe langer een operatie duurt, hoe hoger de algemene kosten.
- D. De tijdelijke relocatie van de bewoners is kostbaar en niet prettig voor de bewoners.
- E. De korte en lange termijn milieueffecten en circulaire bouw. Deze omvatten afval, hergebruik materialen, energiekosten om bouwmaterialen te produceren, recyclen, de mate van energiezuinigheid en duurzaamheid van het versterkte gebouw.
- F. De woonkosten gerelateerd aan de milieukosten. Bij een hogere investering in thermische isolatie en technische installaties kunnen de bewoningskosten sterk verlagen. Op termijn worden deze hogere bouwkosten terugverdiend op de rekening. Hogere investeringskosten kunnen daarom op de lange termijn goedkoper zijn. De vergelijking tussen netto bouwkosten van projecten moeten daarom vergeleken worden met een vergelijkbaar Energie-Index (EI = W/m^2 woonoppervlak).
- G. De speciale eisen van de woningeigenaar voor de verbouwing en uitbreidingen.
- H. De bijdrage van de woningeigenaar of woningbouwcorporatie of andere financieringsoptie.

Bouw-jaar	Rc-muur m ² .K/W	Rc-dak m ² .K/W	Rc-vloer m ² .K/W	Dikte isolatie	Rc-glas m ² .K/W	Letter	Punten scores	EPC rekenfactor	BENG 1 kWh/m ² .jr	BENG 2 F.E. kWh/m ² .jr	BENG 3 H.E. kWh/m ² .jr
								0,0	0		
		10,		30 cm		A++++	51-61	0,1	≤ 15	0	> 50%
		8,0		28 cm		A+++	41-50	0,2 < EPC ≤ 0,4	≤ 30	0 < 50	> 50%
		6,5		17 cm		A++	31-40	0,4 < EPC ≤ 0,6	≤ 70	30 < 50	> 40%
2021	4,7	6,3	3,7	15 cm		A+	21-30	0,6 < EPC ≤ 0,8			
2015	4,5	6,0	3,5	13 cm	1,2	A	2-20	0,8 < EPC ≤ 1,05			
2005	2,5	2,5	1,3	8 cm	0,6	B	< 2	1,05 < EPC ≤ 2			
1992	2,5	2,5	1,3	8 cm	0,5	C		1,41 - 1,8			
1987	2,0	2,0	1,3	5 cm	0,5	D		1,8 - 2,1			
1982	1,3	1,3	1,3	3 cm	0,5	D		1,8 - 2,1			
1976	0,7	1,0	0,3	2 cm	0,5	E		2,11 - 2,4			
1965	0,43	0,86	0,17			F		2,41 - 2,7			
1930	0,35	---	---			G		< 2,71			

Tabel: Vergelijking van bouwjaar met isolatiewaarde, energie-labels en EPC-berekening en 2021 BENG eisen.

³⁵ Deze kosten zijn voor een enkele woning erg hoog, maar omdat veel woningen in eenzelfde structurele categorie vallen, kunnen die allemaal op dezelfde wijze versterkt worden. Wanneer een aannemer eenmaal een bepaald type heeft uitgevoerd, zullen gelijksoortige woningen weinig problemen opleveren.

Bij een aanzienlijke verbouwing, zal de NTA 8800:2020 met de nieuwe jaar 2021 BENG-eisen moeten worden toegepast. Als de thermische isolatie aan de binnenkant wordt toegepast zal het netto woonoppervlak verminderen. Extra verduurzamingsmaatregelen kunnen bestaan uit de aanleg van een Lage Temperatuur Verwarming (LTV), de aanpassing van sanitaire ruimtes, deuropeningen of trappen ten behoeve van senioren of extra vergroting van het PV-areaal, zonneboilers en installatie warmtepomp of warmtenet. Het vergelijken van de kosten van de seismische versterking kan slechts per gebouwtype. Voor een goede vergelijking dienen de voorwaarden A t/m H en het gebouwtype ongeveer gelijk te zijn.



Figuren 6-104. Gelijksoortige gebouwen kunnen samen worden uitgevoerd. De kosten voor de voorbereiding en uitvoeringskosten zullen sterk teruglopen ze een typologie zijn.



Veel bewoners uit de provincie Groningen (of in de rest van Nederland) hebben niet de financiële middelen om zowel schadepreventie te financieren (technische verduurzaming) als thermische verduurzaming (thermisch isoleren, warmtepomp en installaties), ook al zou op de lange termijn de woningwaarde hoger zijn en de gebruikerskosten voor energie lager.

Het aanvullend op de reparaties ontwikkelen van een duurzaam financieringsmodel in Groningen, gericht op een duurzame en milieu-efficiënte bouw en met Nederlands kapitaal is relevant.
