

# Robusthed i Murværk

Vejledning

Realdania



TEKNOLOGISK  
INSTITUT



AARHUS  
UNIVERSITY



Poul Dupont Christiansen  
Rådgivende ingeniør

DANSKE TEGL

KALK- OG TEGLVÆRKSFORENINGEN AF 1893

xella

H+H

PARTNERS IN WALL BUILDING

BIRCH  
EJENDOMME

**Projekttitle:** Robusthed i Murværk

**Projektpartnere:**

Teknologisk Institut  
CVR-nr. 56 97 61 16  
Gregersens vej 1,  
2630 Taastrup

Aarhus Universitet, NAVITAS  
Institut for Byggeri og Bygningsdesign  
CVR-nr. 31 11 91 03  
Inge Lehmanns Gade 10  
8000 Aarhus C

Build, Aalborg Universitet  
CVR-nr. 29 10 23 84  
Fredrik Bajers Vej 7K  
9100 Aalborg

H+H Nordics A/S  
CVR-nr. 13 42 70 89  
Skanderborgvej 234 A  
8260 Viby J

Birch Ejendomme A/S  
CVR.nr. 32 56 50 85  
Sortenborgvej 2  
8600 Silkeborg

Poul Dupont Christiansen Rådgivende ingeniør ApS  
CVR.nr. 38 06 07 83  
Filmbyen 23  
8000 Aarhus C

Danske Tegl  
CVR.nr. 53 31 78 12  
Vesterbrogade 1 E  
1620 København V

**Projektfinansiering:**

Realdania  
Danske Tegl  
H+H Nordics  
Xella

## Indhold

1. Indledning .....	4
2. Baggrund .....	4
3. Bæredygtighedsaspektet .....	4
4. Robusthed i CC 2 .....	6
5. Demonstrationsprojekt i samarbejde med SWECO .....	7
6. Skalatest – Forsøg med bortfald af søjle i samarbejde med Aarhus Universitet .....	7
7. Numerisk simulering af Robusthed .....	8
8. Forudsætninger for robusthedsbetragtninger.....	10
9. Metode A .....	11
10. Metode B .....	11
11. Eksempel 1 .....	12
12. Eksempel 2 .....	15
13. Eksempel 3 .....	17
14. Eksempel 4 .....	18
15. Eksempel 5 .....	21
16. Ældre byggeri m. træbjælkelag, kalkmørtel, etc. ....	21
Bilag 1: Demonstrationsprojekt i samarbejde med SWECO .....	
Bilag 2: Beregningsprincip – Buevirkning i dæk .....	
Bilag 3: Skalatest – Forsøg med bortfald af søjle i samarbejde med Aarhus Universitet ....	
Bilag 4: Robustness of masonry structures made by calcium silicate units .....	
Bilag 5: Tovvirkning .....	

## 1. Indledning

I forbindelse med et Realdania støttet projekt "Robusthed i Murværk" er nærværende vejledning udarbejdet som en metode for robusthedsundersøgelse af murværk.

Vejledningen omhandler uarmeret, bærende murværk som typisk er udført af: Tegl, porebeton, kalksandsten eller letklinkerbetonblokke og anvendt som bærende murværk i bag- og indervægge

Vejledningen anvendes som uformelt baggrundsdokument til S1996 omkring robusthed.

## 2. Baggrund

Robusthed i bygninger er et generelt krav i DS/EN 1990 DK NA:2024, som har til formål at sikre, at en bygning kun er lidt følsom over for utilsigtede påvirkninger og defekter. En konstruktion er robust, hvis der ikke sker et omfattende svigt af konstruktionen, hvis en begrænset del af konstruktionen svigter. En robust bygning kan eksempelvis modstå, at en søjle ødelægges ved påkørsel, uden at der opstår omfattende kollaps.

Nybyggeri af etageejendomme hvor øverste etage er mere end 12m over terræn med bærende murværk ses relativt sjældent i Danmark i dag. I dag er den bærende konstruktion typisk af præfabrikerede betonelementer kombineret med en ikke-bærende skalmur.

Bygherrer som entreprenører er opmærksomme på, at efterspørgslen på præfabrikerede betonelementer kan til tider være en udfordring for byggeprocessen og give flaskehalse. Dansk bygningskultur har imidlertid en rig tradition for murværk og her ses et potentiale for bærende bagmur i murværk, idet standard byggesten og blokke kan leveres fra dag til dag.

## 3. Bæredygtighedsaspektet

Dansk bygningskultur har en rig tradition for murværk, og såvel bygherrer som entreprenører ser et bæredygtighedspotentiale for bærende bagmur i murværk, idet standard byggesten og blokke kan leveres fra dag til dag.

Det er blot vigtigt at sikre, at behovet for en smidig byggeproces ved brug af standard byggesten, ikke leder til overdimensionering og dermed øget materialeforbrug, på grund af tekniske udfordringer med at dokumentere konstruktionernes robusthed. For de udførende entreprenører, betyder udfordringerne med robusthed, at man simpelthen undgår at bygge højere end 12m over terræn, hvilket er lige så kontraproduktivt som overdimensionering.

Eftervisning og dokumentation af bygningers robusthed har i moderne tid været mest aktuelt i betonelementbyggeri, da man har erfaret tragiske eksempler på såkaldte progressive kollaps, hvor et enkelt lokalt konstruktionsvigt spreder sig som dominobrikker over et betydeligt større område. For at imødekomme dette i Danmark, har man i betonbranchen

udarbejdet vejledninger og retningslinjer for etablering af robuste konstruktionsprincipper. Murede etageejendomme har ikke tidligere, på samme måde, stået over for udfordringen med robusthed. Dette skyldes at man før i tiden har haft tradition for at fuldmure massive ydervægge helt op til 60 cm i tykkelsen, hvilket mindskede risici for progressivt kollaps, men samtidig betød et stort overforbrug af materialer en høj klimabelastning.

I moderne muret byggeri, har man af hensyn til isoleringskrav og materialeøkonomiske incitament, typisk en hulmursydervæg bestående af en tegl for- og bagmur, med mellemiggende isolering. Denne type ydervæg, kan i modsætning til fuldmuret massive ydervægge, være mere følsom overfor utilsigtede påvirkninger og defekter. Derfor, har bygningsingeniøren større udfordringer med at sikre robustheden i moderne etageejendomme med bærende murværk.

Eftervisning af robusthed er et lovkrav, og uden vejledning, kan løsningen for murværk resulterer i en overdimensionering af konstruktionerne, som fører til et overforbrug af materialer og dermed mindre bæredygtighed. Alternativt begrænses antallet af etager alene af denne årsag. Projektet belyser bæredygtighedsgevinsten, som vanskeligt kan estimeres forud, da murværk ofte fravælges som bærende konstruktion, pga. manglen på vejledning. Det kan estimeres, på baggrund af tilgængelige EPD'er for hhv. kalksandsten og betonelementer, at alene på det ændrede materialevalg, opnås en CO<sub>2</sub>-besparelse ved materialefremstillingen til bærende bagmur på ca. 20% pr. m<sup>2</sup> bagmur. Her regnes overslagsmæssigt med en elementtykkelse på 150 mm versus en murværkstykkelse på 200 mm, på grund af den lidt højere materialestyrke på betonelementer.

Retningslinjer med fokus på robusthedssikkerhed og bæredygtighed vil være til gavn for det danske samfund, da dansk bygningskultur i høj grad er gennemvævet af murværk. Fuldmuret byggeri har mange tekniske og arkitektoniske fordele, men hvis bæredygtigheden presses på grund af kravet om dokumentation af robusthed, så kan der nok findes andre materialer at bygge i, men Dansk bygningskultur vil miste en traditionsrig bygningskultur med bærende murværk, hvor murværket ikke blot er reduceret til "tapet".

## Bæredygtighedsgevinst

Bæredygtighedsgevinster for en bygning mere flere etager:

1. **Energimæssig effektivitet:** En højere bygningshøjde giver mulighed for bedre udnyttelse af bygningens volumen til energieffektive løsninger såsom naturlig ventilation, dagslysudnyttelse og solenergi. Ved at øge bygningens højde kan man potentielt reducere energiforbruget til opvarmning, køling og belysning pr. kvadratmeter.
2. **Pladsudnyttelse:** Ved at øge antallet af etager udnytter man bygningens fodaftryk mere effektivt, hvilket kan have positive konsekvenser for arealudnyttelsen og byområdets tæthed. Dette kan bidrage til at reducere behovet for nybyggeri på ubenyttede eller grønne områder.
3. **Transport og infrastruktur:** En højere bygning kan have positive effekter på transport og infrastruktur ved at koncentrere beboelse og aktiviteter på et mindre

areal. Dette kan føre til mindre behov for transport og infrastrukturudvidelser og dermed reducere CO<sub>2</sub>-udledning og ressourceforbrug.

4. **Materialer og ressourceforbrug:** Ved en højere bygning kan man potentielt reducere det samlede materialeforbrug og affaldsgenerering.
5. **Klimabelastning:** En højere bygning kan potentielt have en mindre klimabelastning pr. beboer eller aktivitet sammenlignet med flere lavere bygninger spredt ud over et større område. Dette kan bidrage til reduktion af CO<sub>2</sub>-udledning og understøtte bæredygtige byudviklingsprincipper.

#### 4. Robusthed i CC 2

Robusthed i CC2 er behandlet i DS\_EN 1990 DK NA\_2024 i Anneks E1.

Her er for CC2 specifikt angivet (i udpluk):

- (4) ...”For konstruktioner i CC2 vurderes robustheden ud fra de samme principper som beskrevet i (6)” (som er hovedkravende til robusthed ... ”bortfald af element”, etc)

*Dvs der skal redegøres for robusthed for konstruktioner i CC2 ud fra samme principper som for CC3 (dog med nogle lempelser – som beskrevet senere)*

- (5) – Note: ”Nogle elementer kan potentielt optræde i konstruktioner i alle konsekvensklasser, men udpegning som nøgleelement sker kun i de tilfælde, hvor det tilhørende kollapsomfang er uacceptabelt jf. (7)”

*Dvs nøgleelementer kan forefindes i CC2*

- (6) – Note 2: ”vurdering af robustheden i CC2 omfatter en beregning af kollapsomfang ved bortfald af element mhp. identifikation af uacceptable kollapsomfang og udpegning af tilhørende nøgleelementer. Detaljeringsgraden af beregningerne afhænger af konstruktionsopbygningens kompleksitet.”

*Dvs. det enkelte projekt skal vurderes. Det er ikke tilstrækkeligt, blot at udklippe prosa fra forrige projekt*

- (6) – Note 3: Beskrivelse af foranstaltninger til sikring af robusthed i CC2 kan fx indeholde krav til udformning af nøgleelementer, krav til anordning af supplerende forbindelser eller andre foranstaltninger, hvor ekstra sikkerhed på nøgleelementer jf. (9) kan være en mulighed. Ved dimensionering for robusthed i CC2 tages i betragtning, at konsekvenserne af svigt i CC2 er mindre end i CC3

*Dvs. er det nødvendigt at introducere et nøgleelement i et muret byggeri. Dette kan fx være en hjørnesøjle, hvor der på begge sider er så brede vinduer, at det ikke er muligt at udforme udkragede bjælker til at bære søjlelasten pr. etage. Her kan en supplerende stålsøjle være en ekstra foranstaltning jf. (9), som monteres ud over en dimensionering af hjørnesøjlen med en faktor 1.2 på den regningsmæssige last.*

(7) – Note 3: For konstruktioner i CC2 foreligger der ikke konkrete grænser for acceptabelt kollapsomfang. Acceptabelt kollapsomfang fastlægges i stedet i forhold til den konkrete anvendelse og mulige konsekvenser af svigt for den aktuelle bygning. For etagebyggerier i CC2 kan acceptabelt kollapsomfang fastlægges efter samme retningslinjer som for CC3, men % - kravet kan fraviges og antal berørte etage er ikke begrænset til 2.

*Dvs 15 % kravet kan fraviges og sættes højere, hvilket er aktuelt for mindre bygninger. Antal berørte etager kan være alle etager, blot kvm kravet er opfyldt.*

*Fx: Et 5 etages byggeri med beboelse 12 m over terræn på 4. sal og en øverste 5. sal, hvor der kun lejlighedsvist kommer personer, regnes i CC2. Såfremt kollapsomfanget, der optræder ved bortfald af element, er mindre end 360 kvm. Dvs. hvis hjørnelejlighederne er de kritiske (største) må disse, såfremt de er ens, højst være 90 kvm (4 x 90 kvm = 360 kvm) for at kollapsomfanget er acceptabelt.*

(9) ...Såfremt ekstra sikkerhed på nøgleelementer anvendes, bør det samtidig sikres, at konstruktionens modstandsdygtighed overfor utilsigtede påvirkninger og defekter reelt forbedres.

*Dette er fx stålsøjle ved muret hjørnesøjle beskrevet tidligere.*

(10) I DS/EN 1992-DS/EN1999 kan der være angivet regler for, hvordan tilstrækkelig robusthed sikres...

*Denne vejledning danner grundlag for de kommende regler i DS/EN 1996.*

## 5. Demonstrationsprojekt i samarbejde med SWECO

I forbindelse med Realdania projektet er der i samarbejde med SWECO lavet et demonstrationsprojekt, som har haft til formål dels at eksemplificere brugen af denne vejlednings principper og ikke mindst slutresultatet for udarbejdelsen af en Teknisk-faglig redøgørelse. Demonstrationsprojektet forløb sig i perioden Q3-Q4 i 2023 og der blev undervejs i forløbet afholdt faglige sparringsmøder, hvor nogle af principperne blev videreudviklet i projektgruppen. Demonstrationsprojektet udmøntede sig afslutningsvis i to dokumenter:

1. "Notat Brug af robusthedsberegningsmetoder". Udarbejdet af SWECO. Se bilag 1.
2. "A2.1.3 Robusthed" Udarbejdet af SWECO. Se bilag 1.

## 6. Skalatest – Forsøg med bortfald af søjle i samarbejde med Aarhus Universitet

I forbindelse med Realdania projektet blev der i samarbejde med Aarhus Universitet gennemført 1:1 skalatest i laboratoriet på Teknologisk Institut. Forsøget var en del af en kandidatafhandling.

Kandidatafhandlingen tog en deterministisk beregningsmæssig tilgang til at beskrive den strukturelle robusthed af murede konstruktioner. Et numerisk værktøj blev udviklet baseret på nedre værdi analyse, øvre værdi analyse og finite element analyse. Værktøjet blev eksperimentelt verificeret ved at udføre en "søjlebortfaldstest" på en mellem understøttet muret bjælke. Eksperimentet sigtede mod at ligne et moderne murværksbyggeri med blokmurværk af kalksandsten.

Kollaps-scenariet blev simuleret ved en pludselig fjernelse af en midtersøjle i en to-spændt uarmeret murværksramme, hvilket efterlod den resterende konstruktion til at fungere som en bjælke. Det pludselige søjlekollaps blev udført ved at trække en indbygget T-profil ud, der simulerede øjeblikkelig fjernelse. Forud for kollaps af søjlen, blev muren belastet lodret med en hydraulisk donkraft, hvilket simulerede virkningerne af en jævnt fordelt tyngdebelastning fra ovenstående etager.

Prøvningen blev gennemført d.25. maj 2022 og havde til formål at belyse princippet om "alternative lastveje" og enten at bekræfte eller afvise trykbuens virkning som bærende mekanisme inden for uarmeret murværkskonstruktioner, der oplever lokalt kollaps.

Prøvningens gennemførelse fremgår i detaljer af kandidatafhandlingen, som er vedlagt i bilag 3.

Konklusionen for prøvningen og kandidatafhandlingen blev at det var muligt at eftervise, at ved det kvasi-duktilt brudscenarie er metoden "alternative lastveje" en anvendelig robusthedsstrategi for muret konstruktioner og kan karakterisere numerisk ved en nedre og øvre værdi analyse.

## **7. Numerisk simulering af Robusthed**

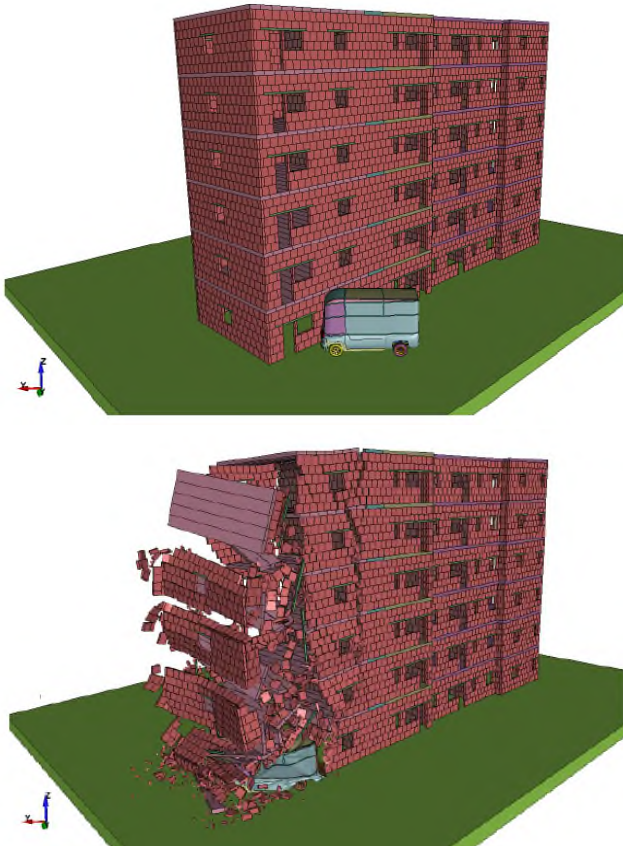
I forbindelse med robusthedsanalyser, kan man involvere brug af avancerede metoder såsom dynamiske analyser, ikke-lineære modeller og last-konstruktion-interaktion. Disse raffinerede analysemetoder er brugbare ift. nøjagtigt at forudsige konstruktionens adfærd under ekstreme belastningsforhold og for at identificere potentielle brudscenarier.

For at opnå en bedre forståelse af konsekvenserne af svigt i lastbærende elementer i traditionelle danske bygninger, blev der ifm. med et studie udført en dynamisk finite element simulering. Studiet blev rekvireret af Xella Danmark og delt med projektgruppen og efterfølgende vedlagt som bilag 4 til dette projekt. Simuleringen gav værdifuld indsigt i brudscenariernes forløb og hvordan man forebygger progressivt kollaps. Det er vigtigt at analysere responsen fra uarmerede murværksstrukturer over for dynamisk belastning grundigt for at sikre deres konstruktive integritet og sikkerhed.

En caseundersøgelse blev udført for at undersøge responsen fra en fleretages murværksbygning med seks etager over for påkørselslast, Se figur 6.1. Bygningen blev modelleret ved hjælp af en mikro-niveaumetode, der inkluderede alle mulige svigtmåder, revnedannelse og belastningsprocesser. Murværksfugerne blev modelleret som kontaktelelementer for at tillade store forskydninger og simulering af svigtprocesser. Den samme tilgang blev anvendt for forbindelserne mellem dæk og væg. Denne detaljerede modelleringsniveau



tillod en mere præcis forudsigelse af bygningens respons over for det højt dynamiske påkørselslast og identificeringen af potentielle brudscenarier.



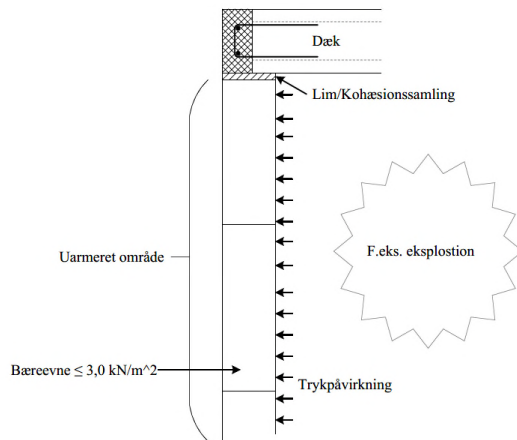
Figur 6.1. Uddrag af skitser fra studie om numerisk simulering af robusthedssvigt ifm. påkørsel

## 8. Forudsætninger for robusthedsbetragtninger

- Murværket betragtes som det svage led i konstruktionen og ved fx en indvendig gasekspllosion eller lignende vil kun et mindre område af en væg kollapse - i stedet for at dækket "løfter sig" og bryder - eller andre ikke-tilsigtede mekanismer (se figur 7.1). Bæreevnen af væggen vil sædvanligvis være langt mindre end egenvægt af dæk med overliggende laster (Se figur 7.2).
- Skillelinje for normforhold mellem EN 1992-1-1 og EN 1996 - 1- 1 er i vederlagsfladen mellem de murede vægge og betondækket (tilsvarende med et træbjælkelag)
- Det forudsættes, at randarmering, fugearmring, etc. i dæk er iht. afsnit 9.10 i EN 1992 - 1 - 1.  
Dvs. eksempelvis  $F_{tie,per} = 80 \text{ kN}$
- Vandrette samlinger mod top og bund af væggene kan udformes som en limet samling (evt. som lim-pap-lim), hvorved kapaciteten forøges markant ift. nuværende løsninger (kohæsions-samlingen kan erstattes af strittere med knas pap)
- Hjørner regnes at kunne kollapse ved terræn (pga. påkørsel)



Figur 7.1. Murværk, hvor væg partielt er kollapsed



Figur 7.2. Brud ved fx gasekspllosion

## 9. Metode A

Metode A i Anneks: E1 (6) i NA:1990:2021 kan ikke anvendes, da det netop her er forudsat, at væggen er det svage led og kollapser delvist

Ved projektering af robusthed for murværk anvendes således metode B. Dvs. konstruktionen dimensioneres for bortfald af element iht Anneks: E1 (6) - (8) i NA:1990:2021 (max 15% etageareal, max 240/360 m<sup>2</sup>, max 2 etager, (max 3 m langt vægfelt bortfalder), etc.)

Bæreevnen i murværk skal etableres ved egnede mekanismer - fx stringere i randudstøbning, buevirkning i det resterende murværk, etc., som kan antages at virke etagevist, således der ikke indtræffer progressivt kollaps.

Dvs. systematikken bliver:

- Kritiske nøgleelementer udvælges
- Disse beregnes ved "Bortfald af element" ud fra relevante metoder
- Eksempler på relevante metoder er angivet efterfølgende
- Såfremt dette ikke er muligt, øges den kritiske regningsmæssige last med faktoren 1,2. Her kan suppleres med andre robusthedsforbedrende tiltag

## 10. Metode B

Bortfald af element beskrives her overordnet vha. en række eksempler samt via praktiske beregninger for en byggesag (i bilag 1). I beregningerne sikres, at der ikke opstår et progressivt brud i det tilbageblivende byggeri. Eksemplerne kan anvendes direkte eller som inspiration til andre metoder til etagevist at sikre mod et progressivt kollaps.

Der regnes normalt med partialkoefficient = 1.0 for materialer, 1.0 for egenlast og  $\Psi_2$  for laster (svarende til ulykkeslast)

Der betragtes hovedsagelig situationer (bortfald af element), hvor dæk spænder vinkelret på bortfalden væg (hvor dæk spænder parallelt med bortfalden væg, er problematikken normalvis ikke eksisterende/reduceret).

Der regnes med *"bortfald af et vilkårligt 3 m langt vægstykke i længde- eller tværretningen."* iht NA.1990.

Dvs. bortfald af et 3 m langt vægstykke i vandret retning og i fuld etagehøjde (dvs. ca. 3 m). Vægstykket regnes enten at være midt på vægfeltet eller omkring et hjørne.

Er den vandrette afstand mellem 2 åbninger  $\leq 3.6$  m regnes hele vægstykket (mellem de 2 åbninger) at kunne bortfalde. Det bortfaldne område bliver således vægfeltet samt bredden af de åbningen/åbningerne (da overliggeren ikke bliver virksom). Dette gælder også for hjørner

Metoderne er vist for nederste etage. Bortfalder dækket, kan de i eksemplerne viste mekanismer optræde én etage længere oppe.

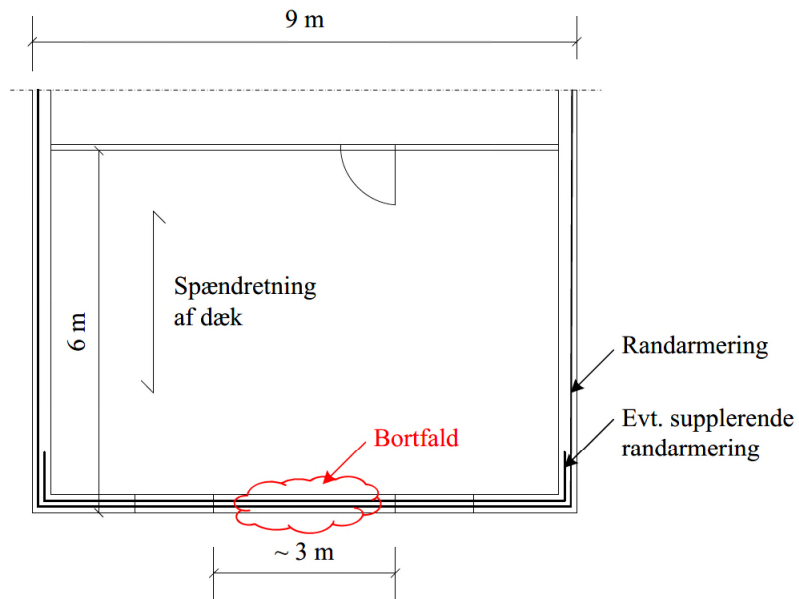
## 11. Eksempel 1

Her anvendes randarmeringen ved hvert etagedæk til at bære ovenstående etagelast. Dette medfører kraftige sætninger af dæk og vægge, men ikke progressivt kollaps

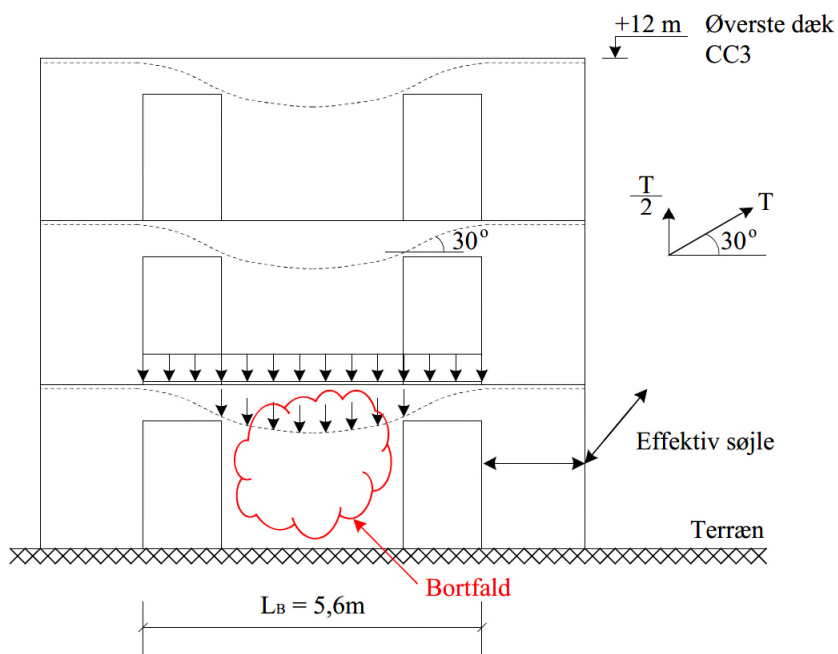
Eventuelt supplerende randarmering kan indlægges (med forankringslængde om hjørnet) ud fra beregningerne. Armeringsmængder kan naturligvis ikke reduceres ift. det oprindelige projekt (dvs. de sædvanlige statiske beregninger samt robusthedskrav fra EN1992-1-1) ved disse beregninger.

Der redegøres overordnet for tryklinier i dækket, der skal optage de eventuelle skrå trykkomponenter i hjørnet.

I praksis vil det for et normaldæk betyde, at afstanden for "restvæggen" (dvs. den del der ikke er bortfaldet) til hjørnet er min. 1.2 m. Se figur 10.2.



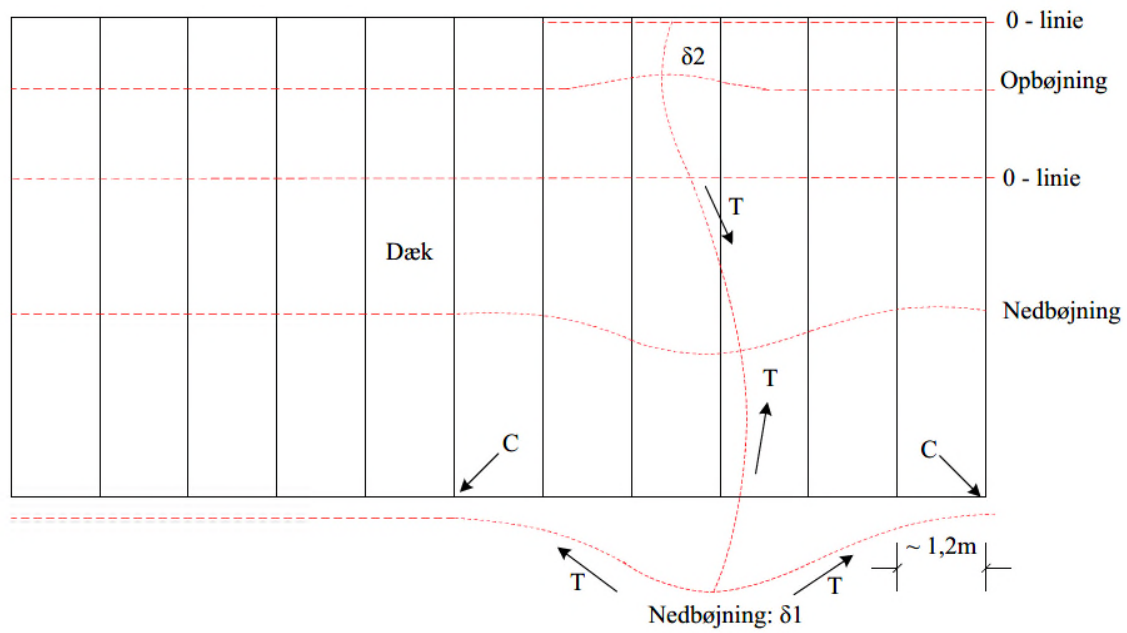
**Vandret snit**



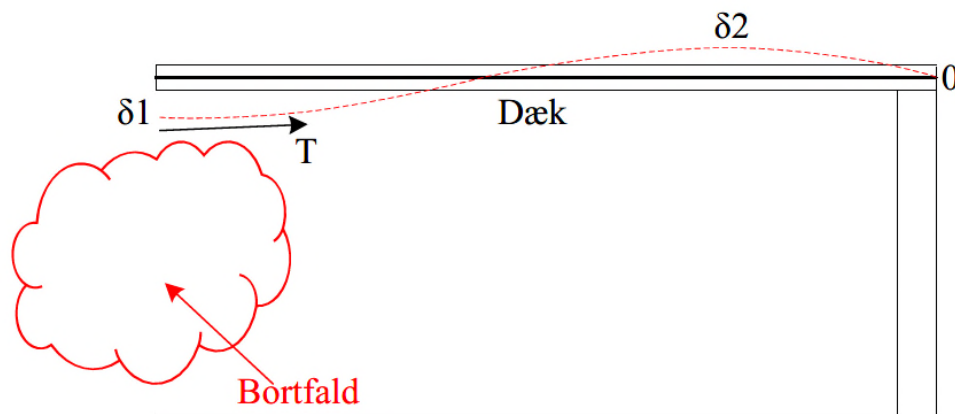
**Opstalt**

$L_B =$  Bortfaldslængde

Figur 10.1. Illustration af metode 1. Randarmering



Figur 10.2. Illustration af stringerforløb i dæk (vandret)



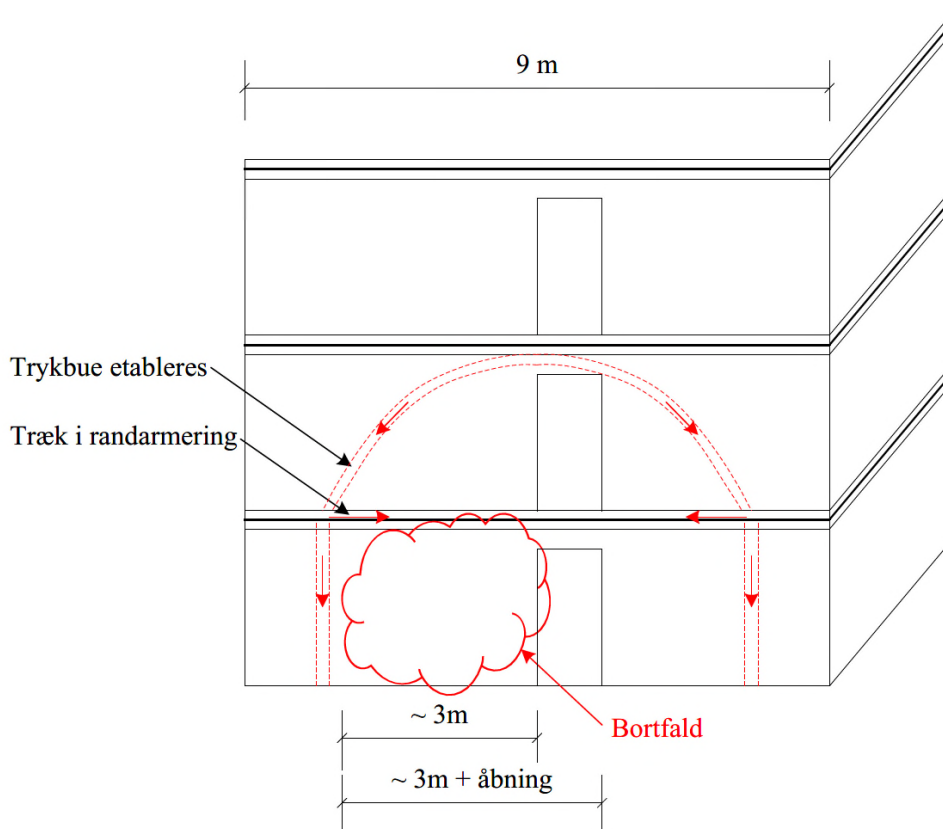
Figur 10.3. Illustration af stringerforløb i dæk (lodret)

## 12. Eksempel 2

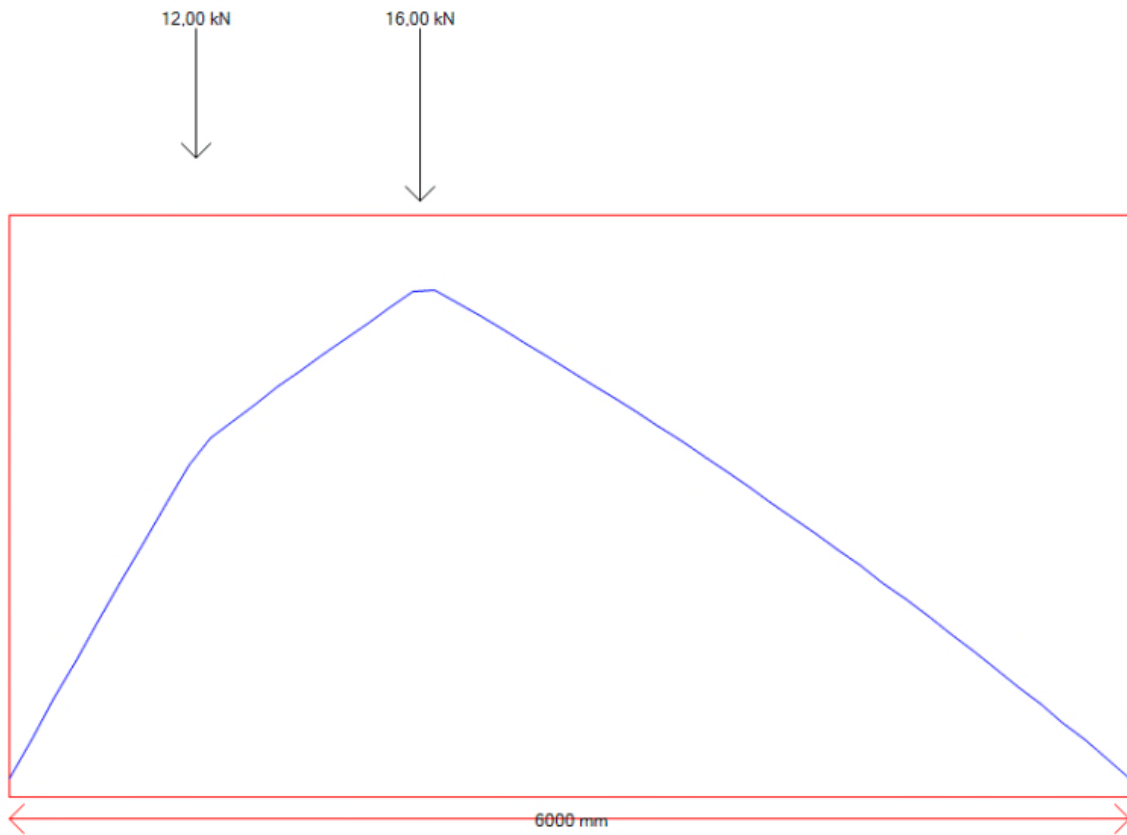
Er lasterne kraftige og kan der etableres buevirkning i de intakte vægfelt, kan dette være en løsning.

Bemærk, at det ikke er muligt at addere kapaciteten fra buevirkning med kapaciteten fra randarmeringen (metode 1), da den nødvendige og tilladelige deformation for de 2 mekanismer er væsentlig forskellig.

En bue beregning kan foretages vha. programmet EC6design.com. Her kan påføres ensfordelt last samt vilkårlige enkeltlaste således, at asymmetriske buer kan beregnes. Tryklinie kan manuelt reguleres således, at den vandrette reaktion minimeres. Se figur 11.2



Figur 11.1. Illustration af metode 2. Buevirkning



Figur 11.2. Asymmetriske buer. Print fra EC6design.com



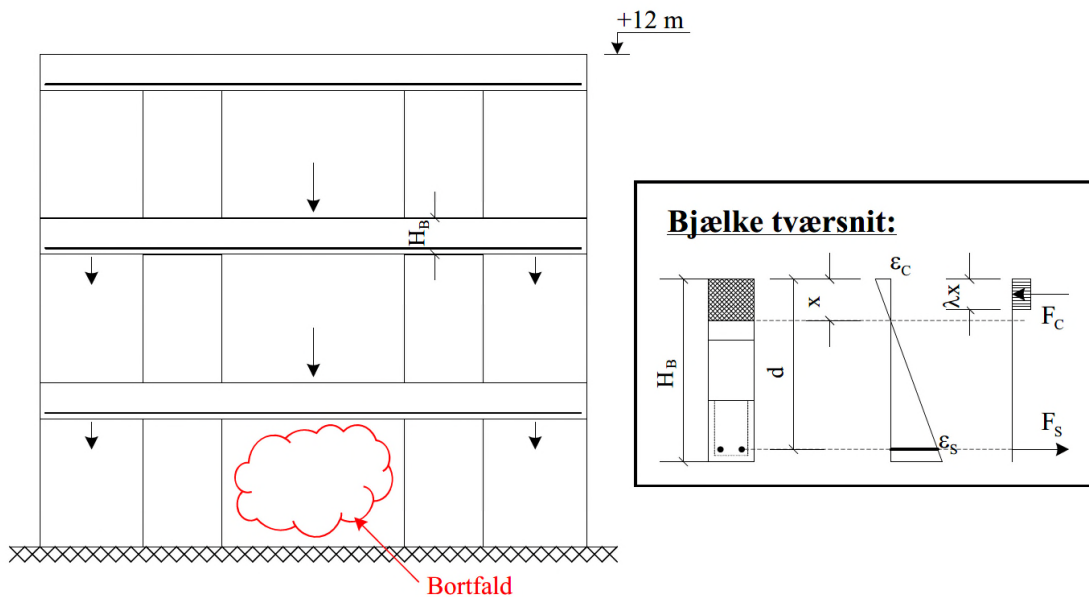
### 13. Eksempel 3

Overliggere kan forlænges således, at de er gennemgående og kan spænde over kritiske vægfelter.

Dvs., der kan indsættes bærende gennemgående bjælker, der sikrer, at etagedæk/væg over bjælken kan bæres ved bortfald af vægelement under.

Ved tilstrækkelig bæreevne kan bærende bjælke indføres i fx hver anden etage.

Beregningen foretages som en traditionel bjælkeberegning for murværk iht EN 1996-1-1. (Beregningsprogrammet EC6design.com kan fx anvendes (Teglbjælkemodulet))



Figur 12.1. Metode 3. Bjælkevirkning

Løsningen kan være relevant, når der er tilstrækkelig bæreevne i bjælkerne og randarmeringen ikke spænder fra hjørne til hjørne og/eller der ikke mulighed for forankring af randarmering pga. høje åbninger rundt hjørnet (dvs. åbninger i flere etager).

## 14. Eksempel 4

Er vinduer/døre placeret tæt på hjørnet og selve *hjørnet bortfaldet*, kan de lodrette laster eventuelt optages via indspændte bjælker fra begge sider.

Dette vil typisk være påkørsel.

Vandrette samlinger mod top skal her udformes som en limet samling, når randarmeringen anvendes ifm. de udkragede bjælker.

Lasterne og geometrien på eventuelle åbninger er normalt forskellig for de 2 vægfelt, der udgør hjørnet og normalt vil bæreevnen for de 2 indspændte bjælker have forskellig udnyttelsesgrad.

Der kan introduceres en arbitrær forskydningskraft i hjørnet ( $Q_h$ ), der aflaster den hårdest belastede bjælke således, at udnyttelsesgraden for begge bjælker optimeres. (Dvs. en statisk tilladelig kraftfordeling)

En typisk fremgangsmåde vil være

- $M_{Rk1}$  og  $M_{Rk2}$  bestemmes. Disse vil normalt være ens, medmindre åbninger har forskellig højde
- $Q_{Rk1}$  og  $Q_{Rk2}$  bestemmes. Disse vil normalt være ens, medmindre åbninger har forskellig højde

- $M_{Ek1}$  og  $M_{Ek2}$  bestemmes som:

$$M_{Ek1} = \frac{1}{2} p_1 \cdot L_1^2 - Q_h \cdot L_1 < M_{Rk1}$$

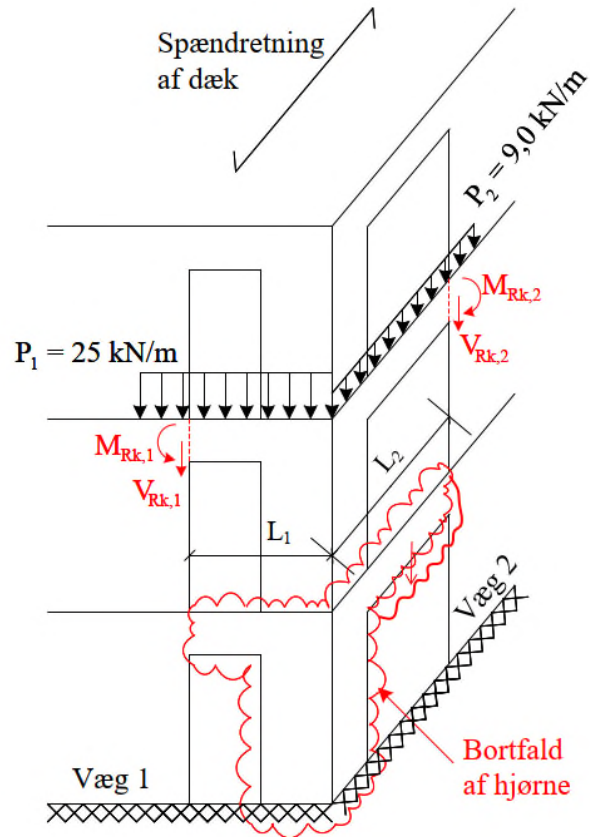
$$M_{Ek2} = \frac{1}{2} p_2 \cdot L_2^2 + Q_h \cdot L_2 < M_{Rk2}$$

- $Q_{Ek1}$  og  $Q_{Ek2}$  bestemmes som:

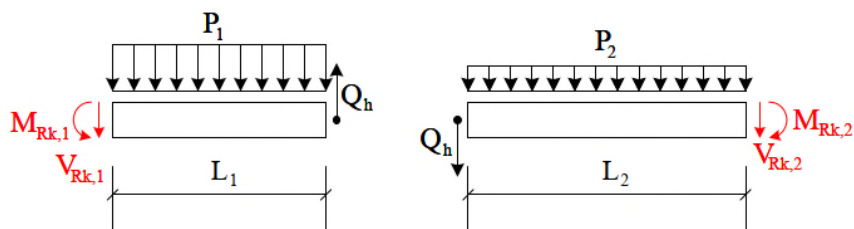
$$Q_{Ek1} = p_1 \cdot L_1 - Q_h < Q_{Rk1}$$

$$Q_{Ek2} = p_2 \cdot L_2 + Q_h < Q_{Rk2}$$

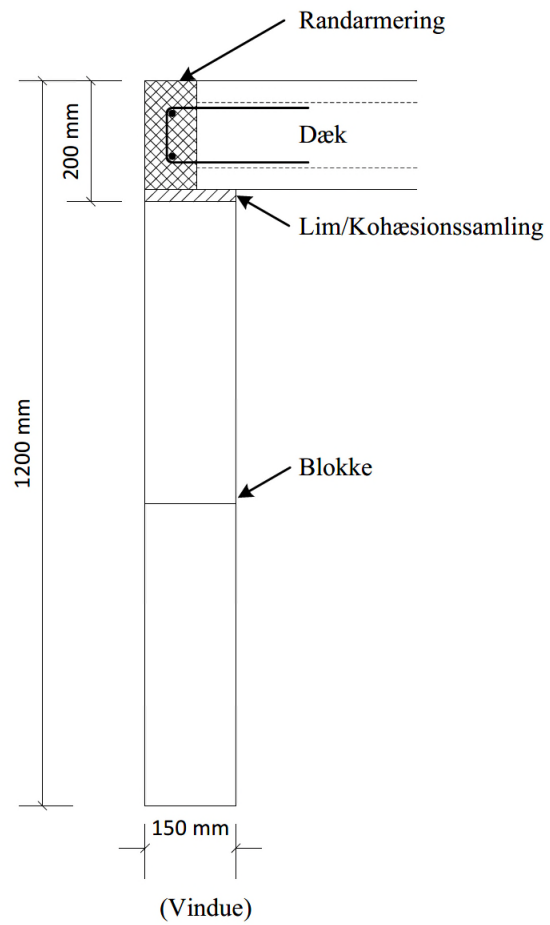
- $Q_h$  optimeres således at alle uligheder er opfyldt. Er dette ikke muligt kan geometrien rettes (dvs. åbningerne gøres smallere, brystningen højere og/eller væggen tykkere, etc. (Geometriske ændringer i facade bør finde sted så tidligt som muligt i projekteringsfasen)



Figur 13.1. Metode 4. Udkragede bjælker



Figur 13.2. Metode 4. Statisk system for udkragede bjælker



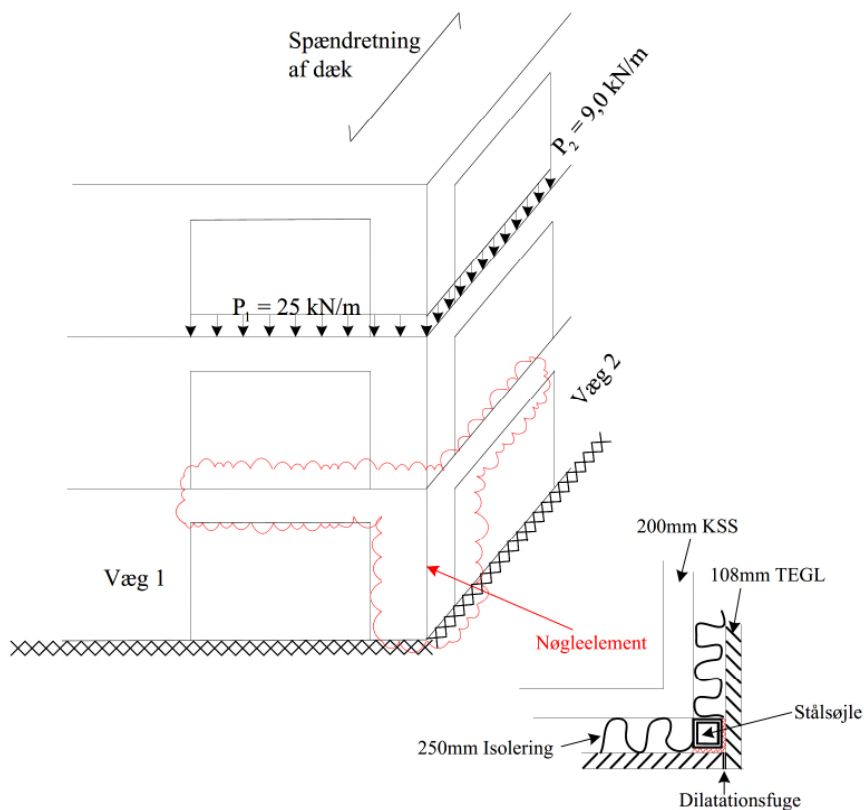
Figur 13.3. Metode 4. Tværsnit

## 15. Eksempel 5

Andre robustheds forbedrende tiltag kan være relevant, såfremt robustheden af et nøgleelement sikres ved at forøge den regningsmæssige last med en faktor 1.2.

Dette kan fx være ovenstående hjørne søjle, hvor robustheden yderligere kan sikres ved fx at montere en stålsøjle i hjørnet (i nederste etage) således, at skader for eventuel påkørsel reduceres markant.

Søjlen vælges ud fra hensyn til geometri og kuldebrosbetragtninger



Figur 14.1. Metode 5. Nøgleelement.

## 16. Ældre byggeri m. træbjælkelag, kalkmørtel, etc.

Beregning af robusthed for ældre byggeri foretages iht til DS/EN 11990:2024 Bæreevnevurdering af eksisterende konstruktioner.