

*Natursten i det danske byggeri,
Anvisning nr. 4
Natursten,
Dimensionering af facader*



NATURSTEN I DET
DANSKE BYGGERI





Realdania

Natursten i det danske byggeri

Anvisning nr. 4 – Natursten, Dimensionering af facader

2006-2009

Final version

Dato 2009-03-05

Udarbejdet af:

Jens Brandt, Rambøll

Teknologisk Institut, Betoncentret
Gregersensvej
DK-2630 Taastrup
Danmark

Telefon +45 7220 2161
www.teknologisk.dk



TEKNOLOGISK
INSTITUT

Rambøll Danmark A/S
Bredevej 2
DK-2830 Virum
Danmark

Telefon +45 4598 6719
www.ramboll.dk

RAMBOLL



Projektet

Natursten i det danske byggeri

er støttet af fonden Realdania i perioden 2006 til 2009

Projektets hovedpartnere:

**Teknologisk Institut, Betoncentret
Rambøll Danmark A/S**

Øvrige samarbejdspartnere:

**E. Pihl og Søn A.S.
ISS Facility Services A/S
Danske Stenhuggerier
Vilhelm Lauritzen AS
All Remove Danmark ApS
StoneCon ApS
Byg*DTU**

**ENC-CC Vejle
Slots- og Ejendomsstyrelsen
Kongebro Natursten
Jeppe Aagaard Tegnesteue
Stenhuggerlauget/Dansk Byggeri
JohnsonDiversey
E. Nielsens Mekaniske Stenhuggeri**



Natursten – Dimensionering af facader

Indholdsfortegnelse

1.	Indledning	2
2.	Moderne anvendelser af natursten i facader	4
3.	Konstruktion/underlag for naturstensfacader	5
3.1	Facader	6
3.1.1	Belastninger	6
3.1.2	Modstandsevne	7
3.1.3	Egenlast	8
3.1.4	Naturlast	9
3.1.5	Frie laster og andre variable laster	16
3.1.6	Statiske laster	16
3.1.7	Dynamiske laster	16
3.1.8	Temperatur- og fugtbelastninger	16
3.1.9	Deformationskrav	17
3.1.10	Deformationer vinkelret på facaden	19
3.1.11	Deformationer i facadeplanet	19
3.2	Bagvedliggende konstruktion	20
3.2.1	Beton	21
3.2.2	Stål	22
3.2.3	Murværk	22
3.3	Facadeopbygning	23
3.3.1	Facadebeklædningens ophængssystem	26
3.3.2	Natursten	29
3.3.3	Luftspalte	29
3.3.4	Isolering	29
3.4	Bærende konstruktion	30
3.4.1	Dimensionering af sten og bæringer	30
3.5	Beskrivelse af ankre og montering	31
3.5.1	Indmurede bæreankre	33
3.5.2	Konsolankre	34
3.5.3	Fischer /KEIL "undercut"-ankre	38
3.5.4	Skinnesystemer	40
3.5.5	Præfabrikerede ankre	41



Natursten – Dimensionering af facader

1. Indledning

Gennem årtusinder har bygværker været opført ved anvendelse af natursten, som erfaringsmæssigt er mest robuste og holdbare. Anvendelsen har været betinget af tidernes forskellige teknikker fra blot at stable sten oven på hinanden, tildanne stenene, så der er opnået gensidig binding via forbandter, sammenføjet og fastholdt i mørtel til dagens metoder, hvor ophænget sker med beslag, bolte og dorne, som fastgøres i stenene.



Foto 1. Skara Brae; I 1859 fandt man efter en kraftig storm Europas ældste stenbygninger på Orkney Øerne nord for Skotland, som kan dateres tilbage til år 2200 før vores tidsregning.



Natursten – Dimensionering af facader



Foto 2. I det 15. århundrede byggede Inkaerne i Peru med meget præcist tildannede store sten uden brug af mørtel.



Natursten – Dimensionering af facader

2. Moderne anvendelser af natursten i facader

I den moderne anvendelse er det fortsat naturstenens fantastiske holdbarhed, robusthed, det æstetiske udseende og signalværdien, der ligger i natursten, som er afgørende for at vælge den ofte dyrere natursten som facadebeklædning.

Det er vigtigt, at man er bevidst om, at facader af natursten skal dimensioneres, så overfladen lever op til samme krav om sikkerhed og holdbarhed som bygningens bærende konstruktion. Det er kun i få tilfælde tilstrækkeligt blot at følge den sædvanlige håndværksmæssige tradition, når natursten benyttes som facadebeklædning. Dette gælder måske i særdeleshed i Danmark, hvor beklædninger med natursten ikke har været nær så udbredt som i vore nabolande.

Ved valg af natursten er der flere faktorer at tage højde for. Ofte er de fleste tilbøjelige til udelukkende at vælge en natursten, fordi den giver et særligt udtryk, som netop passer til det pågældende formål. Det kan være, at der ønskes en bestemt farve, et farvespil og/eller en særlig signalværdi. Af hensyn til at bevare det udtryk, der er valgt ved indbygningstidspunktet, og af hensyn til den pågældende naturstenens holdbarhed er det dog særdeles vigtigt også at tage andre forhold i betragtning.

Desværre er der steder i hele verden set eksempler på, at natursten allerede kort efter indbygningstidspunktet ikke har bevaret det ønskede udtryk eller den nødvendige styrke. Nogle naturstenstyper bliver hurtigt grimme i bestemte miljøer, og nogle mister hurtigt deres styrke, fordi de ikke er egnede til det formål, de er anvendt til. Udover at finde det korrekte design af sin natursten er det derfor vigtigt at undersøge, hvordan den valgte stentype i øvrigt passer ind i det pågældende bygningsprojekt.

Det er væsentligt, at man er bevidst om, at naturstensbeklædninger skal dimensioneres, så de har den fornødne sikkerhed. Ved dimensioneringen er det især naturkræfterne, som er væsentlige at tage i regning, selvom naturstenens egenvægt selvfølgelig også betyder noget.



Natursten – Dimensionering af facader

3. Konstruktion/underlag for naturstensfacader

Hvor natursten tidligere har været anvendt som den udvendige side af massive, bærende vægge, indgår natursten nu hovedsagelig som tynde beklædninger (20 – 40 mm), fordi værktøjerne bliver bedre og bedre til at udskære tynde plader også i store formater på flere kvadratmetre. Som beklædninger kan natursten i tykkelser fra 28 mm til 40 mm komme på tale, når stenpladerne ophænges i dorne mv. Tyndere naturstensplader kan ophænges i beslag monteret på bagsiden eller på gennemgående dorne med f.eks. lukkemøtrikker som ”grisetryner”. Facader udføres primært med åbne fuger og ventileret lufthulrum mellem stenbeklædningen og varmeisoleringen og bærende konstruktion bagved.

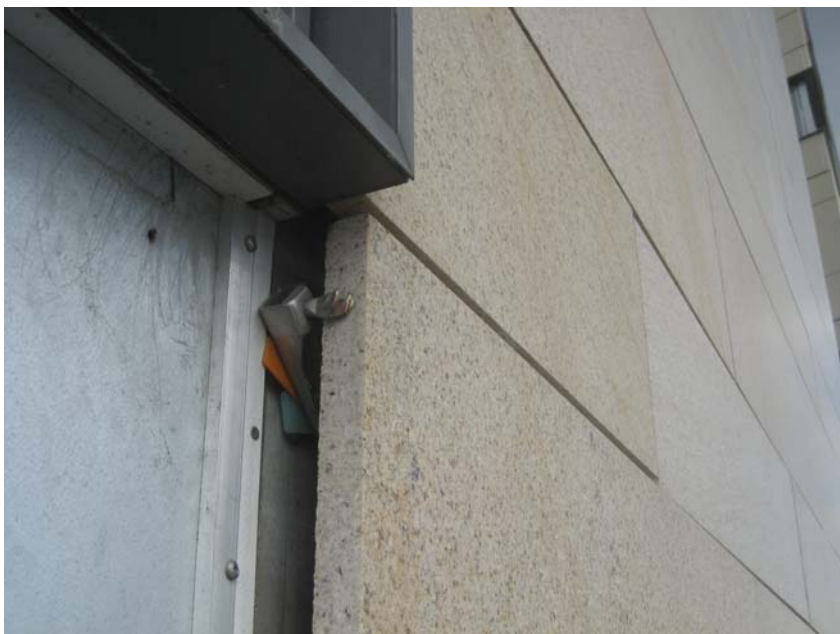


Foto. 4, 30 mm granitplader opsat med dorn på et holdeanker i vertikalfuge.

Indvendigt anvendes natursten i endnu tyndere plader, som ophænges eller oftere klæbes op på vægge med cementbaserede fliseklæbere. Opklæbning af natursten i facaderne er ikke almindelig fordi sikkerheden, for at limforbindelsen bevarer sin styrke, er begrænset.



Natursten – Dimensionering af facader

3.1 Facader

I Danmark er grundlaget for facadebeklædninger af natursten i udstrakt grad baseret på udenlandske metoder og specialfirmaers produkter/beslag for naturstensbeklædninger. Der savnes således dansk håndværkstradition for at montere facader af natursten, ligesom erfaringerne hos arkitekter og ingeniører med naturstensfacader er beskednen.

Kun i enkelte tilfælde har danske firmaer selv udviklet beslag, som dog i udstrakt grad svarer til udenlandske producenter. Det vurderes kun i få særlige tilfælde, hvor der skal bruges mange ensartede beslag hensigtsmæssigt, da der kan være behov for at underkaste beslagene særlig prøvning for at dokumentere styrke mv.

Facadebeklædninger udføres normalt med naturstensplader i tykkelser mellem 20 og 40 mm, afhængig af de indgående pladedimensioner (længder og bredder), og om pladerne er befæstiget i pladekanterne, i bagsiderne eller med gennemgående bolte. Dornbefæstigelser kræver en mindste tykkelse på 28 mm.

Kun i begrænset omfang har man opsat natursten som bagstøbte plader eller opsat med fliseklæber. I visse dele af Danmark er der begrænsninger for i hvilke højder (København 4 m), man kan opsætte fliser ved klæbning alene, uanset om der er tale om naturstensfliser eller keramiske fliser. Reglerne er baseret på erfaringer, som stiller tvivl om, at man ved udstøbning kan opnå den nødvendige holdbarhed. De påvirkninger, som påvirker samlingen mellem natursten og bagvedliggende konstruktion, er oftest netop naturkræfter fra svelning og temperaturforskelle, som nedbryder skillefladen.

Det er selvfølgelig muligt at fastholde natursten i egnede fliseklæbere, blot fliser/plader har en hensigtsmæssig lille dimension, ligesom det er muligt at bagstøbe teglskaller i betonfacadeelementer.

3.1.1 Belastninger

Naturstensfacadebeklædninger belastes som andre facadebeklædninger af:

- Egenlasten for beklædning inkl. ophæng (0,50 – 1,1 kN/m²)



Natursten – Dimensionering af facader

- Naturkræfter fra vind, sne, is, temperaturdeformationer og svind/svelning pga. fugt. Vindlaster vil typisk regningsmæssigt være lidt over 1 kN/m^2 , hvorimod der for de andre påvirkninger ikke kan gives vejledende værdier)
- Frie laster fra f.eks. personer, oplag og påkørsel. Herudover kan monterede genstande påvirke opsætningen.

For beklædninger med natursten vil egenlasten være af stor betydning, fordi stenen med sin massefylde og tykkelse i sig selv vejer mere end f.eks. tynde metalplader, mørtelpuds og tynde fibercementplader. Det er erfaret, at senere eftermontering af naturstensfacader har forårsaget sætninger, fordi bygningen er blevet tungere efter montering af granitfacadeplader.

Ved dimensioneringen sker lastsammensætningen som anvist i DS409 tabel 5.2.8 for henholdsvis anvendelsesgrænsetilstanden (ved beregninger af deformationer og sætninger) og brudgrænsetilstanden (for beregning af bæreevne og styrke).

For facadebeklædningerne er det vigtigt, at man med udgangspunkt i den aktuelle ophængsmetode vurderer de deformationer, som bl.a. temperaturforskelle giver af tvangskræfter, hvor f.eks. stenpladerne er opsat på rammesystemer og skinnesystemer. Især er det vigtigt at huske, at deformationerne fra pladefelt (felter med flere naturstensplader) og pladefelt møder hinanden. Her er det ofte nødvendigt at have større fuger og mulighed for frihedsgrader i de enkelte ophæng.

Belastningerne, som anvendes, skal være karakteristiske værdier svarende til øvre 95% fraktiler og skal iht. sikkerhedsnormen mutipliceres med aktuelle partialkoefficienter. Ved naturlasterne skal man være opmærksom på, at minimaltemperaturen og maksimaltemperaturen er henholdsvis lavere og højere end dem, som anvendes ved beregning af varmetab mv.

3.1.2 Modstandsevne

De lastoptagende dele i naturstensfacaderne mv. skal have en sådan modstandsevne, at lasterne med den nødvendige sikkerhed kan optages. Vær opmærksom på at dette også skal være tilfældet ved brand i minimum 30 min.

Modstandsevnen skal vurderes for alle de dele, der indgår i fastholdelsen af stenpladerne, og omfatter således:



Natursten – Dimensionering af facader

- Naturstenens geometriske tykkelse, bredde og spændvidde mellem understøtningerne og bøjningsstyrken
- Dornhullerne styrke for kræfter i stenpladens plan og vinkelret på fladen. Evt. befæstigelse i stenpladernes bagsider
- Dornens egenstyrke, plasthylser og indlimningsprodukter
- Bodyankeret i den aktuelle placering, skinne/rammesystemets bæreevne
- Fastgørelsen til den bærende konstruktion, som ofte er en ankerbolt
- Den bærende konstruktionsbæreevne.

Hvis modstandsevnen er større end lastpåvirkningen, har konstruktionen den nødvendige sikkerhed mod brud. Reglerne herfor fremgår af DS409 §5.2.8. og tilhørende tabel 5.2.8.

3.1.3 Egenlast

Egenlasten beregnes som produktet af den karakteristiske massefylde og den aktuelle tykkelse.

Eksempel: 30 mm porøs kalksten med en øvre karakteristisk massefylde på 2485 kg/m³ vil have en egenlast på: $g = 0,75 \text{ kN/m}^2$.

Massefylden skal for alle natursten være deklareret af leverandøren. Massefylden vil normalt kun variere ganske lidt inden for en lokalitet og en type. Det vil sjældent være af betydning, at naturstenen i fugtige omgivelser optager vand. For naturstensmaterialer med større variationskoefficient for massefylden skal der foretages særlige overvejelser i forbindelse med dimensioneringen. Ved repræsentative målinger findes stenens massefylde og spredningen på måleresultaterne. Med udgangspunkt i disse målinger beregnes den karakteristiske øvre grænse for massefylden, som kun overskrides i 5 % af tilfældene.

Med udgangspunkt i den karakteristiske massefylde bestemmes den egenlast, der bruges ved dimensioneringen iht. DS409.

Hvis tykkelsen af naturstensfacadepladerne varierer, skal dette naturligvis tages i regning.



Natursten – Dimensionering af facader

Egenlasten påvirker både befæstigelsen i naturstenen (dornene og dornhullet), de beslag, som skal optage den lodrette last og den konstruktion, som facaden monteres på.

De beslag som optager egenlasten, kaldes bæreankre (på tysk. trageanker). De øvrige ankre kaldes holdeankre og sikrer normalt kun, at horizontale kræfter optages.

3.1.4 **Naturlast**

Alle naturlaster (vind og sne) varierer betydeligt fra en lokalitet til en anden og skal derfor fastlægges i det specifikke tilfælde i overensstemmelse med gældende norm (DS410). Lasterne er afhængige af:

- Lokale, maximale vindhastigheder som afhænger af lokale metrologiske forhold, byggeriets placering i landskabet og landskabets karakter og topologi. I Danmark sker der en sondring mellem Vestjylland og det øvrige Danmark. For Færøerne og Grønland gælder særlige regler. Den såkaldte basisvindhastighed er i Vestjylland 27 m/s og 24 m/s i det øvrige Danmark.
- Vindpåvirkningen skal beregnes for hele bygningen. I henhold til DS410 angives det aktuelle vindtryk/-sug for bygningsdele med en størrelse på 10 m² (lokalt vindtryk) og for hele bygningen (globalt vindtryk). DS410 angiver for ”normale” bygninger formfaktorer for overflader mod vinden og på læsiden. For mindre bygningsdele (f.eks. den enkelte facadeplade) skal der anvendes formfaktorer og vindlaster, som er større, fordi vindtrykket ved stærk vind pulserer og påvirker kraftigere jo mindre flader, der betragtes. Særlig opmærksomhed skal rettes mod bygningens kanter, hvor påvirkningen på mindre bygningsdele vil være betydeligt større. Formfaktorerne er afhængig af størrelsen og placeringen af det betragtede element. Der henvises til Eurocode 1, vindlast. (DS/ENV 1991-2-4.)
- Bygningens egen højde og andre bygninger i nærheden har betydning for vindbelastningen. Det er altid den højeste bygning inden, for det lokale område, som giver vindklimaet i det pågældende område.
- Orienteringen kan betyde, at vindtrykket for vindretninger undtagen de vestlige kan nedsættes, fordi man i Danmark statistisk har de største vindtryk fra vestlige vinde.



Natursten – Dimensionering af facader

- Det lokale klima betyder meget for temperaturvariationer og nedbørsmængder, herunder snemængder og sneens densitet. I områder med risiko for ophobning af tøsne eller vandholdig sne kan belastningen øges betydeligt.
- Eventuel risiko for sneophobning og nedskridning skal vurderes for den enkelte bygning herunder indvirken fra naboer. DS410 giver delvist hjælp hertil.

Partialkoefficienten (γ_n) for naturlaster er, fordi værdierne har stor varians større end for egenlaster, som har den mindste partialkoefficient og for frie laster (nyttelaster), som har en partialkoefficient på 1,3. Partialkoefficienten er for naturlasterne jf. DS409 fastlagt til 1,5; ($\gamma_n = 1,5$).

Ved beregning af vindlaster anvendes i Danmark DS410, som angiver regler for bestemmelse af formfaktorerne for bygningsdele med et areal på 10 m^2 (den lokale værdi) og for bygningen som helhed (den globale værdi). For bygningsdele under 10 m^2 og for randzoner indenfor $1/5$ af bygningens bredde iht. DS410 skal Eurocode 1 være grundlag for bestemmelse af formfaktorerne. Der gøres opmærksom på, at lokale formfaktorer langs bygningens kanter kan være så høje som $c_{pe,1} = 1,8$. For tagkanter kan formfaktoren stige til størrelse på mere end $c_{pe,1} = 3,0$.

Udover de umiddelbare tryk og undertryk på bygningens udvendige skal skal der tages hensyn til eventuelt under-/overtryk på beklædningens bagsider. Dette betyder, at vindpåvirkningen af naturstensbeklædninger i Danmark langs bygningernes kanter kan overstige egenlasten betydeligt.

Beregningseksempel.

En bygning er placeret centralt i København i bymæssig bebyggelse, som er relativt frit beliggende mod syd og vest, terrænkategori III iht. DS410. Det fastslås at bygningen mod nord og øst er beliggende i tæt bymæssigt bebygget område, Terrænkategori IV iht. DS410. Mod syd og vest er Terrænkategori III bedst dækkende.

Bygningen har følgende dimensioner:

$$b * d * h = 14,05 \text{ m} * 50,80 \text{ m} * 31,40 \text{ m}$$

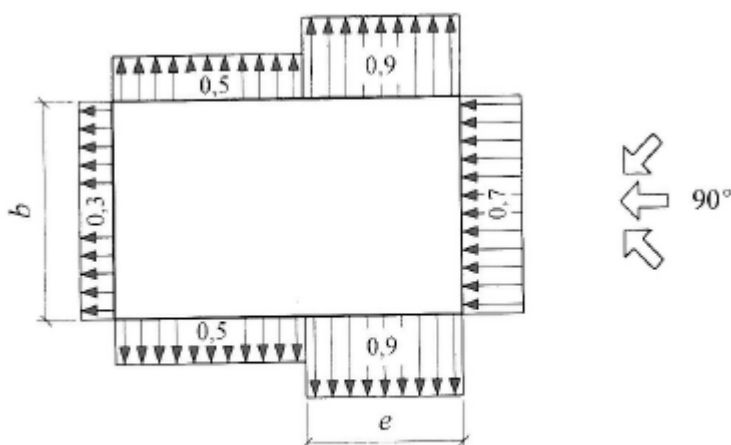


Natursten – Dimensionering af facader

Dette betyder, at der for facader og gavle iht. DS410 skal regnes med et lokalt, maximalt vindtryk på:

fra nord	$q_v =$	$0,60 \text{ kN/m}^2$
fra vest	$q_v =$	$0,94 \text{ kN/m}^2$
fra syd	$q_v =$	$0,76 \text{ kN/m}^2$
fra øst	$q_v =$	$0,60 \text{ kN/m}^2$

Alle vindlaster gælder for vindtryk til luvside, vindsug på tilstødende sider om hjørner og for vindsug på læside. I DS410 er der angivet formfaktorer for vindlaster på bygninger. Faktorerne er opgivet for flader med en størrelse på 10 m^2 . Bemærk at der regnes med vindlast vinkelret mod en facade/gavl.



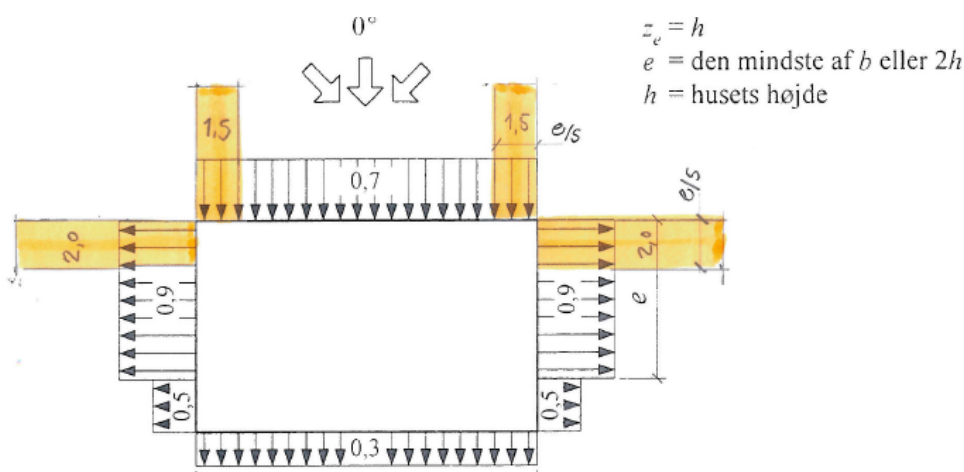
Figur V 6.3.1.1 – Formfaktorer $c_{pe,10}$ for ydervægge vist på grundplan

DS410 angiver formfaktorer på facader og gavle. Bemærk at største talværdi fås for suget på den tilstødende side.



Natursten – Dimensionering af facader

Hvor det som for naturstensbeklædninger er mindre flader, der betragtes, skal der iht. DS/EN 1991-1-4 og DS410 beregnes større formfaktorer tæt på bygningens kanter. Her er de dimensionerende elementer af facadeplader op til ca. $1,0 \text{ m}^2$. Derfor angives formfaktorerne for kantnære elementer (indenfor 2,8 m) til 1,50 for vindtryk og 2,00 for vindsug på tilstødende flader op til luvside. I henhold til DS410 skal der tages hensyn til trykforholdene bag facadepladerne og i bygningens indre, hvor der angives tillægsværdier på formfaktorerne på mellem $\pm 0,3$. I dette tilfælde er der udført fuger med elastisk fugemasse mellem facadepladerne, og der er en forholdsvis tæt bagvæg af in situ støbt beton, og det vælges her at tillægge $\pm 0,10$ svarende til den noget mindre belastende situation.



På alle bygningens flader kan der opstå både vindtryk på luvside og vindsug på læsider og sider parallel med vindretningen. Største sug fås ved hjørnerne op til den luvside (op mod vinden), hvor man i dette tilfælde skal anvende en formfaktor $c = (-2,0 - 0,1) = -2,10$, ligesom der på kanterne på luvside skal regnes med en tilsvarende stor formfaktor med modsat fortegn $c = (1,5 + 0,1) = +1,60$. Da bøjningspåvirkningen er store for både sug og tryk, og da påvirkningen af de dorne, som holder facadepladerne, vurderes at være lige risikable for tryk og sug, kan belastningerne behandles uden fortegn.

Alle facadeplader uanset størrelse har samme tykkelse og 4 ens placerede dornhuller/dorne, som holder facadepladerne i position. Der er udført særlige beslag, som optager egenlast (lodret last). Dornbefæstigelserne skal således alene optage vindlaster. Facadepladernes sugning af vand ifm. f.eks. regn vurderes at være helt ubetydelig



Natursten – Dimensionering af facader

Facadepladernes påvirkning fra vind optages som bøjning og ved tværbelastning ved dornhullerne. Hvis det havde været tilfældet, at egenlasten skulle optages af de samme dorne, skulle egenlast og vindlast summeres vektorielt.

Facaderne har facadeplader i 4 størrelser:

<i>Facadeplade A (h * b)</i>	<i>1220 * 850 mm² (= 1,04 m²)</i>
<i>Facadeplade B (h * b)</i>	<i>610 * 850 mm²</i>
<i>Facadeplade C (h * b)</i>	<i>420 * 850 mm²</i>
<i>Facadeplade D (h * b)</i>	<i>1220 * 250 mm²</i>

Alle plader er projekteret med en 5 mm dorn 100 mm fra pladen i de vertikale fuger. Dette betyder, at de dimensionerede plader er pladerne A og D, hvor det dimensionerede lasttilfælde er vindsug omkring bygningshjørnerne. Pladerne B og C er svagest for et vertikalt brud – forudsat at styrken er ens i begge retninger, alt under forudsætningen om, at alle pladetykkelser er ens, og at de samme beslag anvendes overalt.

For at bestemme den nødvendige bøjningsstyrke for de enkelte plader anvendes iht. DS410 en partialkoefficient på vindlasten, $\gamma = 1,50$.

På styrkeparameteren anvendes en materiale partialkoefficient på $\gamma = 2,50$, da der er tale om forventeligt skørt brud. I tillæg vil der være tale om høj sikkerhedsklasse ($\gamma = 1,10$), da der er tale om en bygning over 5 etager.

Vest facaden.

Vestfacaden er umiddelbart den side, som får den største påvirkning, da vindstyrken fra vest er 25 % større end andre retninger. Her vil man skulle se på facadens kanter i en bredde på e/5 svarende til 14/5 = 2,8 m, som vil få det største vindtryk. På midterfeltet, som er mindre udsat for vindtryk fra vest, vil vindlasten svare til en formfaktor på 0,7.

I nedenstående tabeller er der angivet en nødvendig, karakteristisk bøjningsstyrke og en nødvendig dornstyrke for hver enkelt pladetype i midter- og randfelt. Bemærk at for gavlene gælder, at det er



Natursten – Dimensionering af facader

vindretningen parallel med gavlen, som er afgørende. Dette gælder også for den overvejende del af facaden, som kun for de midterste 22 m vil være bestemt af egentlig luv/læ vind på facaden.

Vestfacade $q_{vr} 0,0,94 \text{ kN/m}^2$	Pladetype A	Pladetype B	Pladetype C	Pladetype D
Nødvendig bøjningsstyrke, midterfelt	2,74	1,90	1,90	2,74
Nødvendig dornstyrke, midterfeldt	0,82	0,41	0,28	0,24
Nødvendig bøjningsstyrke, rand mod nord/syd	5,48/5,69	3,80/3,95	3,80/3,95	5,48/5,69
Nødvendig dornstyrke, rand	1,64	0,82	0,56	0,48
Nødvendig bøjningsstyrke i rand mod top	5,69	3,95	3,95	5,60

Nødvendige bøjningsstyrker angivet som Mpa og for dornhulsstyrken i kN



Natursten – Dimensionering af facader

Sydgavl $q_{vr} = 0,76 \text{ kN/m}^2$	Pladetype A	Pladetype B	Pladetype C	Pladetype D
Nødvendig bøjningsstyrke, midterfelt	3,42	2,37	2,37	3,42
Nødvendig dornstyrke, midterfelt	1,02	0,51	0,35	0,30
Nødvendig bøjningsstyrke, rand mod vest	7,2	4,99	4,99	7,2
Nødvendig bøjningsstyrke, rand mod øst	4,5	3,12	3,12	4,5

Nødvendige bøjningsstyrker er angivet i Mpa og for dornhulsstyrken i kN.

Ovenstående styrker er alle karakteristiske styrker altså styrker, som skal være mindre end middelstyrken bestemt ved forsøg.

I dette tilfælde er der forudsat høj sikkerhedsklasse på grund af bygningens højde, som betyder et tillæg 10%. Der er ikke taget hensyn til, at styrkerne reelt er bestemt på hver enkelt stenplade, som normalt vil betyde, at materiale partielkoefficienten kan nedsættes på to gange 5 % (jf. DS409 5.2.2.e og 5.2.2.f). På den anden side er der ikke taget hensyn til dynamisk last (DS409 6.2), som eventuelt kunne betinge en yderligere reduktion af styrken.

I det omfang dornstyrken skulle være afgørende, kan en eventuel inddragelse af de med elastisk fugemasse fyldte fuger antagelig inddrages. Dette vil have betydning for materiale partialkoefficienten, som i givet fald eventuelt ville kunne reduceres til under 2,50.

Bemærk at eksemplet giver det resultat, at de hårdest belastede plader og bæringer ikke findes på den facade, der vender mod vest, hvor vi har den største vindlast, men på de hjørner på syd og nordfacaden, som støder op til vestfacaden med den største vindpåvirkning.



Natursten – Dimensionering af facader

Det anbefales, at dimensionere hele bygningen for den største vindlast – i dette tilfælde vind fra vest og udføre alle facader ens for at undgå forveksling i udførelsesfasen. De anførte dornstyrker og bøjningsstyrker er normalt heller ikke noget problem, når der anvendes sunde og robuste stenmaterialer.

3.1.5 **Frie laster og andre variable laster**

I det omfang der kan forudses belastninger fra personer, trafik, påkørsel, oplag og ophæng skal disse medtages i beregningerne i forbindelse med dimensioneringen. Nytte (frie) laster medtages i dimensioneringen iht. DS409/DS410.

3.1.6 **Statiske laster**

Statiske laster indgår i sædvanlige beregninger med basis i forannævnte punkter (egenlaster, naturlaster, frie laster og variable laster). Det anbefales, at der altid sker ophængning, sådan at der ikke opstår kræfter i befæstigelseerne på grund af temperatur- og fugtbetingede deformationer. Der vil naturligvis altid ske deformationer, når konstruktionerne befinder sig indvendigt i bygningerne med forholdsvis konstante fugt- og temperaturforhold i modsætning til facaderne, som vil deformere på grund af betydelige temperaturforskelle og fugtforskelle. Sådanne deformationer bør naturligvis kun i meget begrænsede tilfælde påvirke ophæng mv. Det er derfor et godt princip, at alle naturstensplader fastholdes i et hjørne og kun er delvist fastholdt i de øvrige, netop for at undgå opbygning af tvangskræfter.

Hvor naturstenen er ophængt i felter på samme ramme- eller skinnesystem, er det overordentligt vigtigt at vurdere deformationerne op til felternes grænser.

Hvis naturstensplader ophænges i forbandt, skal man huske ikke at binde stenpladerne sammen med dornene.

3.1.7 **Dynamiske laster**

Det antages, at dynamiske påvirkninger normalt ikke er betydende for naturstenskonstruktioner, hvor der i dornsamlinger anvendes glidehylser af PolyEthylen.

3.1.8 **Temperatur- og fugtbelastninger**

Temperatur og fugt har normalt stor betydning for natursten, bærende konstruktioner og ophæng. Ved temperatur- og fugtændringer vil naturstenene ændre dimension.



Natursten – Dimensionering af facader

Hvis naturstenen er opsat sådan, at dette påvirker ophængene, skal der ved projekteringen tages højde herfor. Der anvendes de maximale og minimale grænser for temperatur og fugt, ligesom der her anvendes en partialkoefficient på $\gamma_t = 1,3$, selvom normen normalt skal være større (1,5) for naturlaster. Men vær opmærksom på at minimal og maximal grænsen er større, end der anvendes ved f.eks. beregning af varmetab.

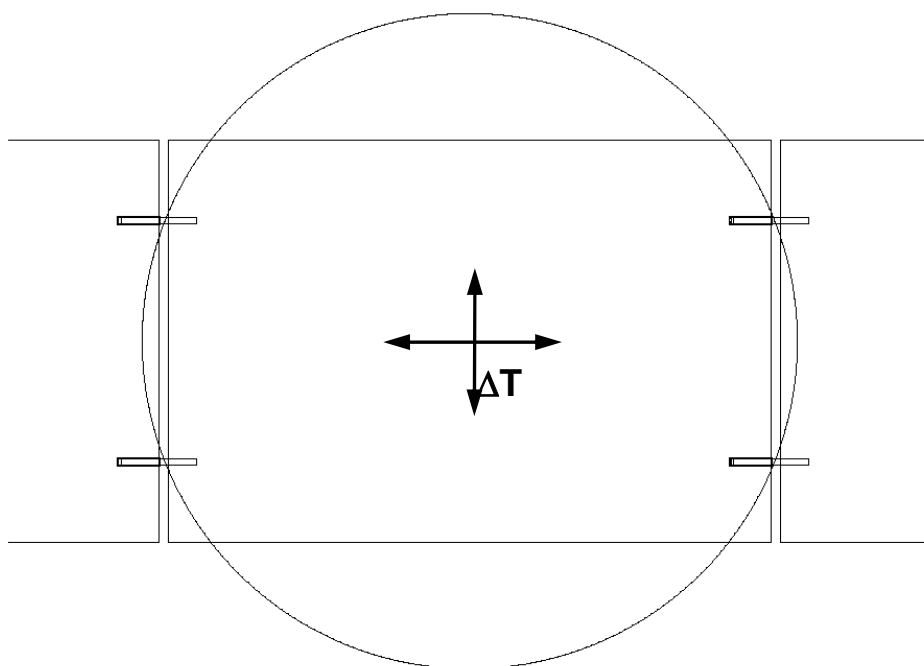
Disse belastninger er især af stor betydning, når man sammenbinder felter af natursten på skinnesystemer og rammesystemer.

3.1.9 **Deformationskrav**

Naturstensbeklædninger skal betragtes som meget stive og ”skøre” materialer og normalt uden ”seje og robuste” egenskaber, når der ses på trækbrud. Normalt vil bruddeformationer i naturstenen være så små, at de er betydelig mindre end deformationer, der optages i befæstigelse og beslag. Dette betyder i praksis, at det som hovedregel må forudsættes, at f.eks. plader, understøttet flere steder end nødvendigt for at være statisk bestemt, skal beregnes understøttet statisk bestemt, hvilket vil sige, at en rektangulær plade ophængt i 4 dorne skal beregnes understøttet på 3 steder, som illustreret på nedenstående figur.



Natursten – Dimensionering af facader



Figur 3. Beregning af optagelse af vindlast. Dornstyrken beregnes ved fastholdelse i 3 dorne.

I praksis vil facadebeklædninger af naturstensplader være fuldstændigt stive i sig selv. Det betyder f.eks. at maksimal vindlast på en 30 mm tyk plade med understøtnings bredde på 1,0 m kun vil kunne få pladen til at opnå deformationer på ca. 0,1 mm. Det medfører, at lasten kun kan fordeles på op til tre understøtninger. Konklusionen er, at målelige pladedeformationer primært sker i befæstigelse/ fastgørelserne, hvor der er tale om f. eks. flytninger i dornhuller og deformationer i bære- og holdebeslag.

Af hensyn til temperatur og fugtbetingede bevægelser skal befæstigelse tillade mindre flytninger og bevægelser. Det skyldes, at befæstigelse ellers vil forvolde skade på naturstenspladerne som følge af de bevægelser, der sker, når fugt- og temperaturdeformationer opstår.

For naturstensprodukter som i forbindelse med gradvis nedbrydning ændrer form kan det medføre brud i dornhuller og beslag, hvis pladerne er fastholdt i flere beslag, end hvad der netop skal til for den statisk bestemte konstruktion.



Natursten – Dimensionering af facader

Kun for tynde naturstensbeklædninger som f.eks. skiferplader vil der være målelige deformationer i beklædningens enkelte dele. Her er det den lille tykkelse og skiferens mindre stivhed og større brudforlængelse (bøjningstrækstyrke), som gør forskellen til andre naturstensprodukter.

Naturstensplader skal i reglen altid ophænges individuelt, sådan at hver plade uhindret kan deformere for vind, temperaturudvidelser og fugtdeformationer. Dette betyder, at plader, som ophænges i 4 punkter, skal være fikseret i kun den ene bæring og understøttet/holdt til i de 3 andre, sådan at deformationer kan ske uden spændinger i befæstigelse og naturstenspladen.

Ophængning i ”kæder” f.eks. ved ophængning i horzontalfugerne med stenplader i ½-stens vandret forbandt skal undgås, fordi der kan opstå ukontrollerede bevægelser og kræfter i dornhuller og dorne.

3.1.10 **Deformationer vinkelret på facaden**

Vindlast vil give små bevægelser vinkelret på facadepladernes plan. Bevægelserne vil for langt de fleste tilfælde være meget små i forhold til deformationerne i f.eks. dornhullerne. I visse tilfælde kan kraftigt solindfald og stor fugtabsorbktion medføre synlige krumninger i facadepladerne, hvorfor statisk overbestemte bæringer er risikable og kan medføre brud.

3.1.11 **Deformationer i facadeplanet**

Det er uundgåeligt, at facadeplader vil deformere og ændre størrelse ved temperaturpåvirkninger og fugtvariation som følge af svelning og i mindre grad svind. I stenpladernes ophæng skal der være plads til disse ændringer, som varierer fra en stentype til en anden, forskellig pladestørrelse og med forskelligt klima. Bevægelserne ses bedst i fugerne, som kan variere i bredde med 1 - 3 mm fra sommer til vinter.

For en marmorplade med en dimension på f.eks. 1,8 m vil pladerne i Danmark kunne ændre sig 1,3 mm på grund af temperaturen alene. Mindre kendt er det, at også øget fugtindhold giver anledning til bevægelser, som er endda større end temperaturbevægelserne. Hertil skal det tilføjes, at svelning og temperaturudvidelser ikke er fuldt reversible (stenen vender ikke helt tilbage til udgangspunktet) for alle stentyper. Man vil derfor opleve, at fugerne med tiden vokser sammen. Hvis bevægelserne for de enkelte plader ikke er mulig, vil der enten ske brud omkring forankringerne, eller bevægelsen vil opsamles ved hjørne og f.eks. vinduesfåse med større skader til følge.

Ved projekteringen kan man således være tvunget til at forudsætte, at fugerne ud over bærebæslaget skal have en fri åbning på ikke mindre end 3- 4 mm pr. 1 m pladestørrelse. Ved anvendelse af ankre



Natursten – Dimensionering af facader

på stenpladernes bagsider kan fugerne selvfølgelig være mindre, end hvis der skal være plads til et bærebæslag med dorne i fugerne.

I visse tilfælde opsættes flere facadeplader på samme større stålrammer til større felter med dimensioner på f.eks. 6 m. Fugebevægelserne bliver dermed betydelig større og skal i hvert enkelt tilfælde gennemtænkes omhyggeligt.

3.2 Bagvedliggende konstruktion

Naturstensbeklædninger kan opsættes på næsten alle typer underlag, som opfylder kravet til en holdbar og stiv konstruktion som f.eks:

- Armeret beton
- Armeret letklinkerbeton som helvægselementer
- Murværk af tegl, betonbyggeblokke, letklinkerbeton og porebeton, hvad enten der er tale om rammer med udfyldning eller egentligt murværk
- Stålkonstruktioner.

De forholdsvis stive naturstensbeklædninger kræver stive bagvedliggende konstruktioner med god evne til at bære de forholdsvis tunge naturstensbeklædninger. Kun for lette natursten, som tynde skiferplader o.lign. anses bagvægge af træ og lette reglar med cementbundne fiberplader egnet som underlag for natursten.

I det danske klima er det normalt at udføre varmeisolering mellem de bærende facader og naturstensbeklædninger således, at den bærende konstruktion eller væg bevares i det forholdsvis temperaturstabile indeklima. Det skal medtages i projekteringen, at bæringer af stål og aluminium, som gennembryder varmeisoleringen, vil virke som skadelige kuldebroer, og derfor skal medregnes som punkt- og linietaf i beregningen af facadens samlede isoleringsevne. Det er ligeledes vigtigt, at det sikres, at bæresystemer ikke kan lede vand og luft ind gennem isoleringen.



Natursten – Dimensionering af facader



Figur 4. Det er vigtigt at isoleringen slutter helt tæt omkring bæreankret (indstøbt røranker). Bemærk at spalten under ankeret sikres et gab på nogle mm, sådan at stenpladen gives mulighed for at deformere lidt.

For alle bagvedliggende konstruktioner for naturstensbeklædninger gælder det, at der skal være en sådan materialestyrke, –robusthed og holdbarhed, at fastgørelsen af de nødvendige beslag for fastholdelse og bæring af naturstensbeklædningerne har den normfastlagte sikkerhed.

3.2.1 **Beton**

Betonvægge og betonelementvægge danner ofte det mest naturlige underlag for naturstensfacader, da det vil være muligt med boremontage at anbringe alle beslag for bæringen af naturstenene. Det er naturligt at have betonvæggene på den varme side af varmeisoleringen og udnytte betonvæggene som den lufttætte del af facaden og som dampspærre.

Det er vigtigt at montere isoleringen tætsluttende, presset op mod betonvæggen for at få det fulde udbytte af isoleringen. Af hensyn til bæreslagene for naturstenen skal isoleringen skæres tæt omkring disse, så kuldebroen bliver mindst mulig. Det er ofte ikke nødvendigt at udføre en egentlig vindspærre på isoleringens yderside, da vindtætningen i bagvæggen (fuldtudstøbte fuger) bør være tilstrækkelig. Den nødvendige tætning omkring vinduer, døre mv. skal naturligvis udføres, ligesom

Natursten – Dimensionering af facader

man skal være opmærksom på, at vand og fugt trænger ind i isoleringen og kan forvolde skade på lysninger o.lign.

Bæreankrene, som føres igennem isoleringen vil medføre lokale kuldebroer, som skal medtages i beregningen af den samlede vægs isolans. Der gøres opmærksom på, at rustfrie stålbeslag leder varme mere end 10 gange mindre end aluminium i samme dimension. Rustfrit stål er normalt det materiale med bedst holdbarhed, når der ses bort fra de særlige problemer med spændingskorrosion i kloridholdige atmosfærer.

3.2.2 Stål

Facadekonstruktioner af stål vil også kunne danne et egnet underlag for en naturstensbeklædt facade. Frihedsgraderne for placering af ophæng vil være mere begrænset, fordi ophængene skal ske i den egentlige konstruktion, eller man er bundet til at anvende en underkonstruktion umiddelbart bag naturstensfacaden (rammer eller skinnesystem). Her gælder det ligeledes oftest, at der mellem stålkonstruktionen og facadestenene skal isoleres med en ventilationsspalte mellem isolering og natursten. Den isolerende væg skal mod indeklimaet have en pladebeklædning, som kan udgøre den færdige indvendige overflade og damptætning. På isoleringens yderside skal der tilsvarende være en vindspærre for at sikre lufttæthed og fuld effekt af isoleringen. Der skal sikres en kompakt isolering, som ikke forringes af vinden uden for facaden. Isoleringsleverandørerne leverer lagdelt mineraluld, som har en tættere og mere robust overflade af en tungere mineraluld. Isolering af mineraluld er af naturlige årsager næsten enerådende i disse tilfælde.

På samme måde som for betonløsningen skal bæringer og gennemføringer i isoleringen medtages i beregningen af facadevæggens samlede isolans. Det skal her anbefales at undersøge eventuelle kuldebroers virkning på den indvendige side af facaden.

Den ventilerede spalte mellem isolering og naturstensplader kan virke uheldig i forbindelse med brand og skal derfor medtages som et fokusområde i forbindelse med projekteringen.

3.2.3 Murværk

I samme grad som bagvægge af beton kan murværk udgøre den bærende del af facadekonstruktionen. Der skal til forskel fra betonløsningen anvendes befæstigelsesbolte til murværket, som tager hensyn til den mindre styrke i fastgørelserne. Dette vil betyde, at ekspansionsbolte mv. skal være i større dimension i forhold til beklædning af betonvægge.



Natursten – Dimensionering af facader

Også her anvendes hulrummet mellem murværk og natursten som ventilation bag naturstenen.

3.3 Facadeopbygning

For alle facader gælder, at de skal opfylde de fysiske krav til bæreevne, tæthed, varmeisolering, afskærmning mod udeklimaet og det arkitektoniske udseende. Naturstensfacadebeklædninger har normalt alene den opgave at fungere som regnskærm og som den visuelle, arkitektoniske overflade for bygningen. Natursten giver facaden ekstra tyngde, og som sådan vil den også virke støjdæmpende.

Natursten bruges i dag næsten aldrig som et bærende element, som det var almindeligt i gamle byggerier, hvor holdbare sokler f.eks. var delvist opmuret af tilhuggede natursten. Ved bygningernes tilslutning mod fortove og befæstede arealer skal man fortsat tage hensyn til den ekstraordinære fysiske og kemiske belastning, som dette giver. Således er flere sand- og kalkstenstyper ikke holdbare tæt på fortove og kørearealer som saltes.

Ved brandadskillelser i bygningen skal disse føres ud, således at ventilationsspalten bag naturstenene afbrydes af fastholdt mineraluld.

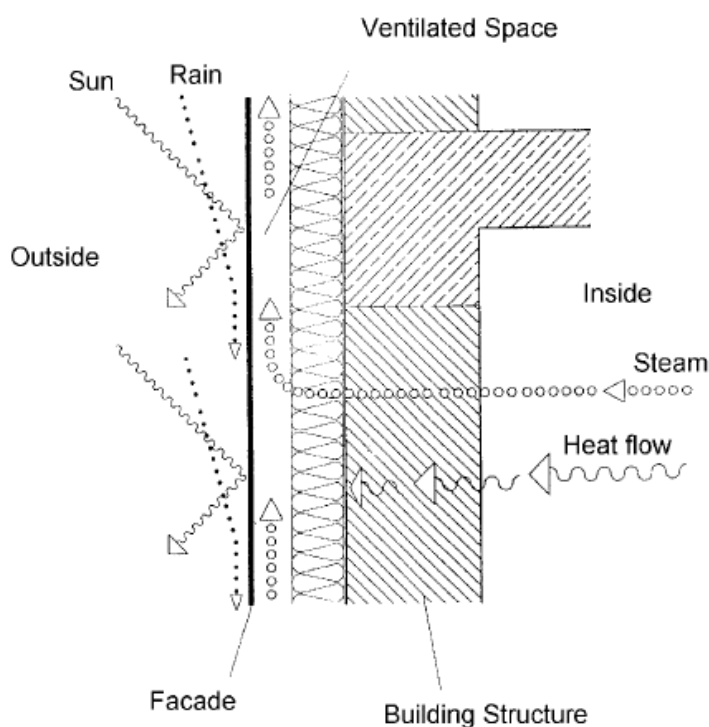
I dagens sædvanlige facader indgår følgende konstruktive elementer, beskrevet udefra:

1. Regnskærm og den udtryksmæssige bygningsoverflade med fuger (design)
2. (Fugeandelen udgør normalt mellem 1 og 3 % som enten er åben eller lukket med en elastisk/plastisk fuge)
3. Ventileret hulrum, normalt 15 – 30 mm
4. Vindspærre som er et diffusionsåbent plademateriale, en diffusionsåben banevare, en vlies eller en særlig tæt og formstabil mineraluld
5. Varmeisolering skal være formstabil, tætsluttende og holdbar og skal i Danmark være mindst næsten 200 mm tyk. Der anvendes næsten kun mineraluld, da f.eks. polystyren er brandbar
6. Bærende bagmur af beton, murværk eller som en stålkonstruktion



Natursten – Dimensionering af facader

7. Dampspærre hvis bagvæggen ikke i sig selv kan fungere som dampspærre
8. Indvendig overflade.



Figur 5. Principssnit i en facadekonstruktion

Naturstenen indgår som facadebeklædning i regnskærmen og den udvendige arkitektoniske overflade af bygningen. Her vil naturstenen og den aktuelle overfladestruktur, forbandter og fuger udgøre den synlige overflade, som giver bygningen det tilstræbte udseende og arkitektoniske udtryk. Ved facadens afslutning i bunden ved terræn kan det være hensigtsmæssigt at sikre naturstenen ved bagstøbning mod påkørsel mv.

Det ventilerede hulrum bag naturstenene bliver oftest udluftet gennem fugerne mellem naturstenspladerne. Enkelte steder kan det vælges at fuge beklædningen sammen med plastiske eller elastiske fuger. I sådanne tilfælde skal der være passende huller, hvorigennem ventileringen alligevel kan sikres. Det ventilerede hulrum er hensigtsmæssigt, da beklædningen herved kan afgive



Natursten – Dimensionering af facader

den opsugede fugt fra både for- og bagside, hvorved evnen til at holde sig tør er forbedret mindst 4 gange. Et ventileret hulrum vil ofte være mellem 25 og 30 mm. Opvarmning fra bygningen og solindstråling vil betyde, at udtørringen bliver god, fordi der vil på grund af skorstensvirkningen ske god gennemstrømning i spalten med tør luft.

Dagens krav til lave U-værdier betyder, at varme tilskuddet fra bygningen vil være forholdsvist mindre end tidligere, hvilket dog vurderes kun at have betydning for nordvendte facader.

Vindspærren på ydersiden af isoleringen anvendes for at forbedre isoleringens holdbarhed og for at opnå en god, tør, lufttæt og effektiv varmeisolering. Vindspærren skal være betydelig mindre damptæt ($< 1/10$) end væggen på den varme side af isoleringen for sikkert at undgå kondens i isoleringen mod vindspærren. Vindspærren vil være gennembrudt af bæringerne for facadebeklædningen, som i den forbindelse skal sikres, så bæringerne ikke transporterer vand ind i isoleringen. Vindspærren skal ligeledes sikre, at der ikke er kanaler og huller, hvor kold udeluft kan strømme ind til den varme side af isoleringen, som dermed bliver uvirksom og kuldebroer dannes.

En lufttæt vindspærre kan også tilgodeses for tætte bagvægskonstruktioner, hvis man sørger for at isoleringen bliver kompakt opsat (betonvægge og murværksvægge). Man kan også anvende vindspærre som f.eks. en isolering med vlies beklædt overflade. Udskæringer i isoleringen for bærebæslag er latente åbninger, som kan medføre, at isoleringen bliver mindre effektiv og tillader vand at løbe ind i isoleringen.

Varmeisoleringen skal dimensioneres med henblik på at opnå den ønskede isolans (U-værdi) for facaden som helhed. For facader med naturstensbeklædninger udgør de bæringer, som gennembryder isoleringen, betydende kuldebroer, som har en væsentlig betydning for facadens samlede isolans. Det skal her pointeres, at det ikke er uden betydning, om der anvendes beslag af aluminium, alm. stål eller rustfrit stål, da varmeledningsevnen er meget forskellig (λ -værdier for aluminium 200, for stål 50 og for rustfrit stål 17 W/mK), hvilket betyder, at kuldebroen ved anvendelse af aluminium i stedet for rustfrit stål er $11\frac{1}{2}$ gange så stor for samme dimension). Ved beregning af kuldebroen skal såvel varmeledningen gennem beslaget som effekten på isoleringens forringede isolation omkring beslaget tages i betragtning. Kuldebroerne ved beslagene betyder stadig mere, jo større isolans/tykkelse isoleringen har. Huller og åbninger ved beslagene, som kan lede kulde ind til isoleringens bagside forværrer kuldebroerne betydeligt.



Natursten – Dimensionering af facader

På indersiden af isoleringen findes sædvanligvis den bærende konstruktion af beton, murværk eller stål. Det er mest hensigtsmæssigt, at den bærende del holdes på den indvendige side af isoleringen, da der her vil være mest konstant temperatur og lille fugtighed. Den bærende konstruktion skal naturligvis bære selve huset med nyttelast og bruges til at fastgøre det bærende system for facadebeklædningen, men vil også, når den er placeret inden for isoleringe, virke som passiv varmeakkumulering. Ny beton med faseskiftende tilslag har endnu bedre akkumuleringsevne.

Af fugttekniske grunde skal dampmembranen placeres på den varme side af isoleringen, hvad enten der er tale om en sædvanlig PE-folie, eller f.eks. at betonvæggen betragtes som dampbremse.

Den bærende konstruktion udgør normalt den indvendige overflade, som tilpasses det ønske, som der måtte være til væggen indvendige side.

3.3.1 **Facadebeklædningens ophængssystem**

Naturstensbeklædningerne skal sædvanligvis bæres af bygningens primære lastbærende bygningsdele og må derfor gennembryde dampmembran, isolering, vindspærre og ventilationshulrum.

Ophængssystemet består normalt af særlige rustfrie ståldele og profiler, som dels kan bære naturstenen og fastholde den i den rigtige position. Der findes flere principielt forskellige systemer, som anvendes til de forskellige facadetyper.

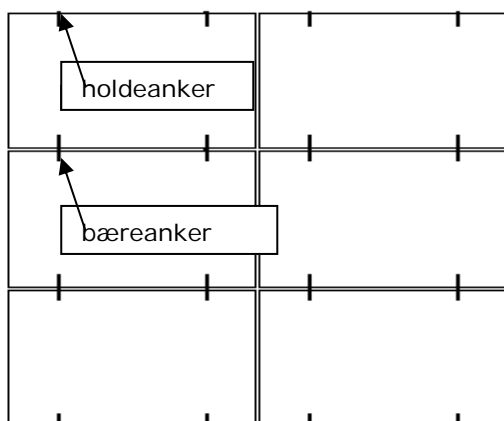
Med dagens krav til varmeisolering vil der normalt være mere end 200 mm fra den bærende bagvæg ud til naturstensfacadernes bagside. Ved passagen gennem isoleringen vil der altid være krav om, at den del af ophængssystemet, som befinder sig i udeklimaet, skal kunne ændre dimension i forhold til bagvæggens næsten konstante dimension uden at give ukontrollerbare tvangskræfter i ophængssystemet og befæstigelserne, som er tilfældet, hvis skinnesystemer ukritisk fastgøres flere steder til bagvæggen.

Det mekaniske system, som skal bære og holde naturstenene, forbindes til naturstenene med dorne, lapper, skinner eller gennemgående ankre i naturstenene. Alternativt kan fastgørelsen ske i bagsiden af naturstenene med særlige ekspansionssankre.

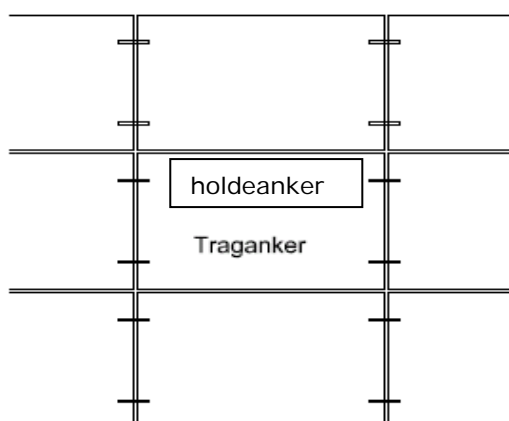
Dornbefæstelsen kan enten ske i naturstenspladernes vertikale fuger i pladernes kanter eller i horizontale fuger i bund- og overkanterne af pladerne.



Natursten – Dimensionering af facader



Bære og holdeankre i horizontale fuger



Bære og holdeankre i vertikale fuger

Dornene sættes i præcist borede huller, som holder afstemte kantafstande til både den synlige, udvendige overflade og den gemte bagside. Afstanden skal normalt være ca. 10 mm til overfladen, hvorfor pladetykkelser mindre end 30 mm næppe er mulig ved dornmontering i naturstenspladernes sider. Det er selvfølgelig vigtigst, at afstanden til den synlige yderside er ens, for at stenpladerne kan nå samme udvendige plan.

Dornhullerne bores i overstørrelse i forhold til dornens diameter på 5 mm (eller 6 mm) af hensyn til tolerancer, glidehylser og temperaturdeformationer. Dornhullet er ofte 8 eller 9 mm. Dornhullet



Natursten – Dimensionering af facader

bores med kalibreret afstand til ydersiden, for at pladekanterne efter monteringen skal flugte på ydersiden.

Boring af dornhuller skal ske med kernebor, og boring med sædvanlig slagboremaskine bør ikke accepteres. Dornstyrken forringes betydeligt ved brug af slagboremaskine i forhold til kerneboremaskine, da der ved slagene dannes små revner i stenmaterialet, og fordi boring med slagboremaskine sker med mindre præcision.

Dornene bæres på det såkaldte bodyanker (Halfen), som er et stykke rundstål, som i den ene ende er sammenpresset til en tykkelse på ca. 5 mm med et boret konisk hul, som passer til dornens diameter, og hvor der i den anden ende er skåret gevind for fastgørelsen på stålkonsollet/konstruktionen. Bodyankeret skrues fast og sikres med låsemøtrik/-skive, så rystelser ikke kan løsgøre ophænget. Bodyankeret skal være af rustfast stål. Fremstillingen af bodyankeret med den fladpressede ende skal undersøges for eventuelle revner og svagheder, som kan opstå under forarbejdningen af stældornen.

Hvis facadepladerne bæres på skinner, som fastholdes i en udfræsning i naturstenspladernes underkant, skal dette bæres af påboltede beslag på bagvæggen. Skinnebæringer kan enten udføres sådan, at der i stenpladens top og bund udskæres et gennemgående spor (en not) som positionere de enkelte plader og overfører vindsug og tryk til den bagvedliggende konstruktion. Noten kan også være diskret, sådan at stenpladerne bæres i to eller flere punkter. Som for bæring på dorne skal denne ene bæring være låst, hvorimod de øvrige skal kunne optage mindre bevægelser.

Natursten kan endelig gøres fast i gennemborede huller i naturstenene, som enten lukkes med møtrikker som ”grisetryner” eller dækkes af indlimede skiver af naturstenen selv. Det sker ofte ved sikringsarbejder, at der efterlades en synlig skive og møtrik på ydersiden. Tynde naturstensplader som f.eks. skifer kan have synlige kroge af fladstål, som ”kroger” om en kant, der bærer de enkelte plader. Sluttelig kan f.eks. skifer på samme måde som for tage ophænges på lægter.

Tyndere naturstensplader (15 – 20 mm) kan befæstiges bagfra i såkaldte ”undercut” udfræsninger med formtilpassede ankre, sådan at befæstigelserne ikke er synlig udefra. Ved disse befæstigelser kan der bruges tyndere naturstenplade, da der i kanterne ikke skal bores huller for dorne eller udfræses noter.



Natursten – Dimensionering af facader

Når der udføres facadebeklædninger af natursten, bør facaden forberedes for montering af facadestilladser i fremtiden. Stilladsankre findes i de forskellige fabrikater og findes for befæstigelse i horizontale og vertikale fuger.

3.3.2 **Natursten**

Naturstenen, som anvendes i en facadeløsning, skal være egnet til det aktuelle tilfælde og have dokumenterede egenskaber som anført i anvisning 3 - Valg af natursten. Det er væsentligt at stenene har tilstrækkelige fysiske egenskaber som bøjningstrækstyrke og dornstyrke. Disse egenskaber skal fremgå af leverandørens CE-mærkning.

3.3.3 **Luftspalte**

Luftspalten mellem isoleringen og naturstenen sikrer en hensigtsmæssig, hurtig udtørring af stenen og en bortventilering af den fugt, som passerer gennem facaden og dampspærren. Det anbefales, at projektere en spalte på ikke under 20 mm for at sikre en åben spalte. For høje facader anbefaler flere fabrikater af beslag, at spaltens bredde øges til f.eks. 30 – 40 mm.

3.3.4 **Isolering**

Til isolering mellem bagvæg og natursten anvendes formstabil mineraluld med god isoleringsevne som f.eks. λ -klasse 37 eller 39. (0,037/0,039 W/mK).

Som tidligere nævnt er det overordentligt vigtigt, at isoleringen opsættes kompakt og lufttæt mod den tættere bagvæg. Herudover skal det sikres, at isoleringens tilpasning omkring beslag mv. er sket omhyggeligt. Udskæring af en cylindrisk prop som sættes på plads igen, når beslaget er monteret, er ofte den bedste løsning.

Omkring vinduer og døre er det vigtigt, at lysninger og false også er optimalt isolerede. Omkring disse klæbes murpap eller EPDM folier, som leder eventuelt indtrængt vand ud til ventilationsspalten og derved sikrer den mere sårbare indfatning/lysning om vinduer og døre.

Af hensyn til brandsmitte, hvor vinduer o.lign. er placeret i facadestenens plan, skal man sikre sig, at der kompakt omkring vindueslysninger udføres tæt og brandsikker isolering.

Natursten – Dimensionering af facader

3.4 Bærende konstruktion

3.4.1 Dimensionering af sten og bæringer

Det vil være nødvendigt, at dimensionere byggeprojektets største plader for egenvægt, naturlaster og frie laster iht. DS409 og DS410.

Dimensioneringen skal ske med baggrund i stenmaterialets styrkeegenskaber og brudmekanisme i henhold til DS409, som giver retningslinier for bestemmelse af regningsmæssige styrker for tryk og trækspændiger. Der gøres opmærksom på, at en række egenskaber for naturstenen har betydning for den partialkoefficient, der skal anvendes. Natursten vil normalt knække ved et skørt brud, som betyder, at partialkoefficienten skal være stor ($\gamma_m = 2,5$).

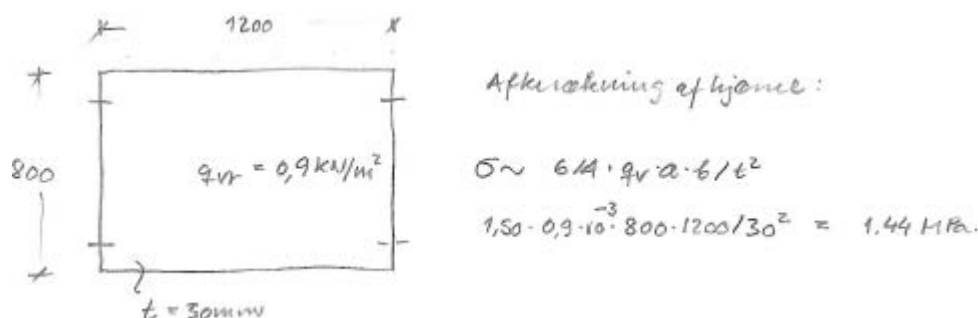
Det er nødvendigt for dimensioneringen, at der er bestemt karakteristiske værdier for trykstyrke, bøjningstrækstyrke og dornhulsstyrke. For at bestemme de karakteristiske værdier (95% fraktiler) skal der udføres et tilpas stort antal prøver, for at statistiske værdier har mening. I tilfælde af anisotrope materialer skal lagdeling og orientering fastholdes i prøvningen for den undersøgte indbygning. Ofte vil leverandøren kunne give de nødvendige styrkeværdier, når der foreligger en CE-mærkning. Det har vist sig, at leverandørernes oplysninger om styrke mv. enten er bestemt for længe siden eller fra meget små stikprøver. Dette betyder, at det er en god ide at foretage fornyet prøvning, så grundlaget bliver mere præcist.

For dimensioneringen skal der anvendes de laster, som angives i DS409 og DS410. Her gøres opmærksom på, at f.eks. vindbelastningen langs bygningens randzoner er betydeligt større end den er midt på fladerne. Da naturstenspladerne normalt er små i forhold til bygningen, skal det tages i betragtning, at vinden ved sin pulseren skal multipliceres med relevant formfaktor. Jo mindre plader jo større formfaktor, jf. DS410 og Eurocode 1.

For bøjningspåvirkning af en plade med 4 understøtninger skal det forudsættes, fordi pladen er meget stiv i forhold til understøtningerne, at pladen alene understøttes af 3 punkter som vist nedenfor.



Natursten – Dimensionering af facader



Figur 7. Bøjningsberegning for en facadeplade

På samme måde som pladen skal dimensioneres for ”den statisk bestemte” situation, skal befæstigelseserne for en 4 punktsfastholdt plade kunne optage pladens halve last. (dornbæreevnen skal være bedre end den halve pladelast).

For natursten befæstiget i bagsiden gælder ikke nødvendigvis samme forhold, som hvis pladerne er fastholdt i kanterne, fordi et skinsystem er mere fleksibelt end de sædvanlige holde- og bæreankre. Som følge af at befæstigelse sker inde i pladefeltet, vil plademomenterne naturligvis tillige blive betydeligt mindre, hvorfor sådanne bæresystemer kan gennemføres med mindre pladetykkelser.

Anvendes gennemprøvede ophængssystemer fra f.eks. tyske eller svenske leverandører, kan det forventes, at leverandøren har typeprøvet beslagene og opnået akkrediteret certifikat for vertikal bæreevne, træk og trykstyrke for vindlast. Afprøvningen omfatter både mekanisk styrke, holdbarhed og materialekvaliteter. De certificerede beslag vil altid være mærket fra leverandøren som garanti for brugeren. Den løbende certificering og 3. partsovervågning betyder naturligvis større sikkerhed, men også en noget større pris. Det anbefales kun at anvendes produkter med akkrediteret certifikat, da brug af udenlandske kopiprodukter kan vise sig at være langt dyrere på sigt. Det må kunne tages i betragtning, at natrustensfacader bør være holdbare i mere end 100 år.

Dimensionering og dokumentation af *egen udviklede* beslag mv. kan være særdeles omfattende og sandsynligvis urealistisk, fordi man ofte ender med også at skulle teste de indgående beslag.

3.5 Beskrivelse af ankre og montering

I Italien har man i århundreder bygget bygninger med facader af teglstensmurværk. Man byggede med en profileret mur ydersider for senere, ofte efterhånden som der blev råd til det, at påmure

Natursten – Dimensionering af facader

beklædninger af marmor, som blev opstillet og bagfyldt med mørtel og med klammer af bronze mellem mørtel og naturstensplader.

Montering af naturstensfacader i moderne byggerier kan ske på mange forskellige måder. Hvor man i for-tiden murede de fint tildannede natursten fast, bruges en sådan teknik kun sjældent i dag. I nutidens byggeri opbygges facaden ofte som en ventileret naturstensbeklædning uden på den bærende konstruktion.

Til opsætningen af natursten anvendes der både bærer og holdeankre for dorne i naturstenspladekanterne, skinnesystemer for tilsvarende ankre og ”undercut” ankre til fastholdelse af pladerne i bagsiderne. Traditionel montage af naturstensfacader sker typisk ved, at stenene monteres direkte på betonkonstruktionen ved hjælp af bæreankre og holdeankre som med dorne i pladesiderne bærer og holder pladerne på plads. Alt efter typen af ankre monteres de henholdsvis direkte på betonkonstruktionen eller på skinnesystemer, hvor man har lidt større friheder for at passere områder uden massive bagvægge. Afstanden mellem betonkonstruktion og naturstensplader laves tilpas stor, så der er plads til 20-30 mm ventilationsspalte og op til 200 mm isolering. Af hensyn til temperatur- og fugtbevægelser er det vigtigt, at der er fuger mellem de enkelte sten, så der er plads til at optage deformationer som følge af ændringerne. Fugerne kan enten være åbne eller tætnet med en elastisk fugemasse. Hvor man i den første årrække, hvor man beklædte bygninger med mekanisk fastholdte naturstensplader, brugte indmurede ankre, anvendes i dag næsten udelukkende påboltede bærebæslag.

Der findes adskillige typer af monteringsystemer med hver sine fordele. Valg af forankringssystem kan ske ud fra en teknisk og økonomisk vurdering af hele ydermurskonstruktionen. Allerede ved projektering af en konstruktion bør stenfacadens monteringsystem studeres nøje. Ved at tilpasse den bagvedliggende konstruktion kan totalomkostningerne til montage af naturstensfacader minimeres. I alle tilfælde er det vigtigt, at monteringen sker præcis, som det forskrives for det enkelte monteringsystem.

Under normale omstændigheder vil naturstenspladerne have lang holdbarhed på mere end 100 år. Monteringsystemet skal derfor vælges med omhu, så det ikke er nødvendigt at udskifte facaden, fordi beslagene ikke lever op til samme holdbarhed.



Natursten – Dimensionering af facader

3.5.1 Indmurede bæreankre

Den tidligste mekaniske montering af naturstensfacader skete typisk ved, at stenene monteres direkte på ankere, som var indstøbt i den murede væg eller betonkonstruktionen i udsparinger. Ankrene monteres i udsparingerne og blev fastholdt i cementmørtel og opsat i lod og vage, som respekterede de naturstens-plader, som derefter blev monteret på stedet i borede huller i pladekanterne og bagefter fastholdt af dorne, som blev slået i stramt tilpassede huller i ankrene. Ankrene var udformet sådan, at de kunne bære naturstenspladerne i og med den ønskede udkragning, der var nødvendig af hensyn til isoleringen. Metoden med udspattringer anvendtes tidligere, fordi boremontage var besværlig, og fordi ekspansionsankre ikke var nær så pålidelige som i dag.

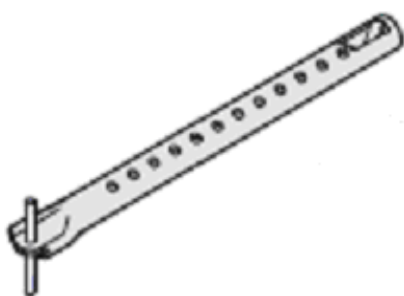


Fig. 8 Rørformet bæreanker til indmuring i udsparing i betonvæg (Halfen UMA. Ved moderne montager skal rørankrene være forholdsvis lange, da de skal indstøbes ca. 100 mm, og isoleringen fylder måske 200 mm.



Fig. 9 Indmuringsankre af rustfrit stål indmuret i henholdsvis horizontalfuge og lodfuge.



Natursten – Dimensionering af facader

Indmuringsankre som Halfen UMA kan udføres med udkrugning på op til 300 mm og kan således opfylde dagens krav til knapt 200 mm mineraluld, vindspærre og 20 mm ventileret hulrum. Rørankret kan monteres i såvel vandrette som lodrette fuger med 5 og 6 mm dorne med midterbryst. Bæreankrene sættes indmålte i kerneborede huller eller udsparinger i cementmørtel. Opsætningen skal ske meget præcist efter opmåling i planet, kote, vage og lod, sådan at dornen får korrekt placering.

Isætning af indmurede ankre sker oftest fortløbende i forbindelse med montering af beklædningspladerne i rækkeforløb. Midlertidigt kan pladerne bæres på midlertidige kiler o.lign. Bæreankrene er sammenpressede i bæreamrådet med fastholdelsesdornene. Der skal udover plads til bæreankret være et frit rum på ikke under 2 mm af hensyn til svelning og temperaturudvidelse. Indmurede bærebeslag og holdebeslag udføres af rustfrit, syrefast stål svarende til mindst kvalitet AISI 316 L med mere end 2½% molybdæn.

Som supplement til bæreankrene anvendes de tyndere holdankre for at fastholde facadepladerne i korrekt placering, når pladerne bæres i lodfugerne. Holdebeslaget fylder normalt mindre i fugen end bærebeslaget.

Det fremgår, at indstøbte bæreankre stiller meget høje krav til præcision, da der ikke er egentlige justeringsmuligheder i monteringen.

3.5.2 **Konsolankre**

I nyere facadekonstruktioner anvendes næsten alene boremontage og mekaniske ankre eller limankre til at bære henholdsvis justerbare konsolbeslag. Afstanden mellem betonkonstruktion og natrustensplade tilrettelægges tilpas stor, så der er plads til 20-40 mm luft og op til 250 mm varmesulning.

Der findes adskillige typer af monteringsystemer efter forskellige principper og med hver sine fordele. Valg af forankringssystem kan ske ud fra en teknisk og økonomisk vurdering af hele ydervægskonstruktionen. Selvom beslagene er forholdsvis dyre, er det først og fremmest arbejdslønnen montagen, der er afgørende for valget. En enkel montering, som tillader hurtig opsætning, bør foretrækkes.



Natursten – Dimensionering af facader

Allerede ved starten af projekteringen af en konstruktion bør stenfacadens monteringsystem analyseres. Ved at tilpasse den bagvedliggende konstruktion kan totalomkostningerne til montering af naturstensfacader minimeres. I alle tilfælde er det vigtigt, at monteringen sker efter de anvisninger, som det forskrives for det enkelte monteringsystem uden at udvikle egne mere eller mindre ”smarte” delløsninger.

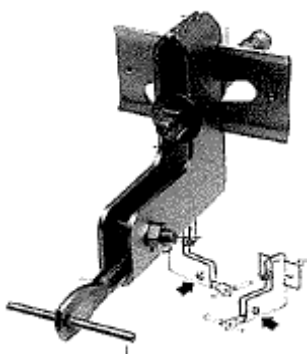


Fig. 10 Konsolankre med Halfen Bodyankrer type DT. Konsolbeslaget monteres på bagvæggen med et ekspansionsanker, som bores fast. Konsollet kan med kileskinnen justeres til præcis højde og fastspændes. Bodyankret kan herefter indstilles sådan at dornen når planet midt i naturstenspladerne. Bodyankret fastspændes med skruen gennem konsollet. Konsollet justeres horizontalt ved at tillade, at konsollet sidder en smule skævt i forhold til lod.

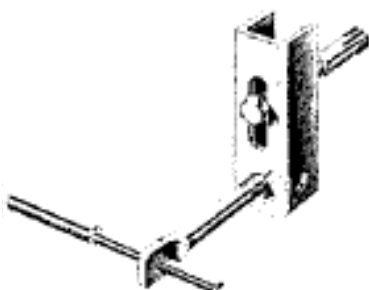


Fig. 11 Her vises det simple holdebeslag, som holder naturstenpladerne i korrekt afstand fra bagvæggen. Bodyankret er i mindre dimension, da beslaget alene skal optage vindtryk og –sug på pladen.



Natursten – Dimensionering af facader

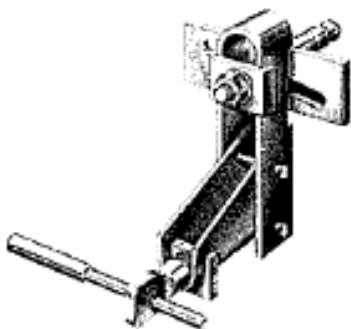


Fig. 12 Konsolbeslag fra anden leverandør.

Under normale omstændigheder skal naturstenspladerne have meget lang holdbarhed og være fuldt funktionsdygtige i måske 100 år. Hvorvidt monteringsystemet kan leve op til samme lange holdbarhed beror på nøje udvalgte metalkvaliteter og overfladebehandling.

Det er i almindelighed problematisk at blande forskellige metaller uden på forhånd at have forholdt sig til metallernes plads i spændingsrækken og nedbrydning af zinklagstykkelser som beskyttelse af almindelig sort stål. Der angives i litteraturen forventede tab på zinklagstykkelser i forskellige miljøer, som i Danmark kan være mellem 2 og 3,5 μm .

For rustfrit stål skal man være opmærksom på, at kloridholdige miljøer kan give risiko for spændingskorrosion. I kloridholdige miljøer skal spændingskorrosion i rustfrit stål altid vurderes omhyggeligt.

Et forkert valg på blot en enkelt del i systemerne kan betyde, at hele facadebeklædningen skal nedtages for at udskifte en gennemgående detalje, som er fejlplaceret.

Herudover er det vigtigt, at der er åbne fuger mellem de enkelte sten, så der er plads til at optage deformationer som følge af ændrede temperatur- og fugtforhold. For hver enkelt facadeplade skal disse være fastholdt i et punkt og understøttet i de øvrige, så der ikke kan opstå tvangskræfter mellem de forskellige ophæng af hver plade. Fugerne skal være så åbne, at der i alle tilfælde er frie spalter omkring bodyankre og metalplader i fugerne.

Fugerne oftest åbne, men kan også være fuget med en elastisk fugemasse. Fugemassen skal vælges, så den ikke giver misfarvning af naturstenene. Mange silicone fugemasser betyder misfarvning, ligesom fugemassen kan fastholde skidt og snavs.



Natursten – Dimensionering af facader

3.5.2.1 Dornsystemer

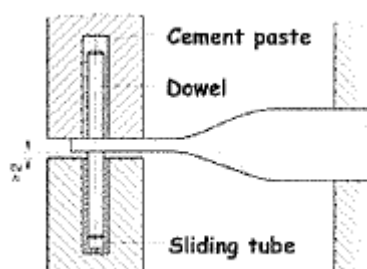
Dornsystemer kan almindeligvis anvendes på to forskellige måder. Dornene kan fastholdes enten ved hjælp af bodyankre, ophængningsvinkler, skinner eller indstøbte ankere. Dornsystemer bruges i de fleste tilfælde til montering af udendørs naturstensfacader. Både ophængsankre og indstøbte ankere fastgøres på den bagvedliggende konstruktion.

Ved metoden, hvor rørankre indstøbes, forudsættes der en vis hærdeperiode før ankret kan bære lasten, hvilket kan besværliggøre monteringsarbejdet, når der kun kan opsættes et ”skifte” adgangen.

Et typisk konsolbeslag består af to primære dele: En u-formet krop, bærebæslag til montering på den bærende konstruktion og en gevindskrue med to dorne på, se fig. 11. Ankret kan justeres op og ned i højden, ydermere kan der ske reguleringer ind og ud i forhold til den bagvedliggende konstruktion. De to tilpasningsmuligheder sikrer, at naturstenspladen kan placeres korrekt, også selvom ankeret skulle være monteret en anelse upræcist, eller hvis der f.eks. er varierende hulrumstørrelse mellem den bærende konstruktion og facadepladerne. Til de afsluttende natursten ved hjørner og kanter anvendes specielle ophængningsankre.

Dimensionerne af ankere og dorne afhænger af hvilken last, de skal kunne optage.

Det er af væsentlig betydning, at dornhullet er større end selve dornen, da der ellers vil opstå problemer, når naturstenen bevæger sig som følge af temperaturpåvirkninger. Dornene fastgøres ved, at de bankes forsigtigt ind i de forborede huller. På den ene dorn anvendes en glidemuffe, som skal sikre, at naturstenen kan bevæge sig som følge af temperaturpåvirkninger. Den anden dorn fastholdes som regel ved hjælp af cementpasta eller epoxy. Husk at klæberen/cementpastaen ikke må komme under bæringen og derved forhindre den underliggende plade at svulle eller at udvide sig på grund af øget temperatur.





Natursten – Dimensionering af facader

stenpladernes bagsider. Udfræsningerne er undersænkede, sådan at en låsning skan ske med en ekspanderende ring, som fastholder ophænget.

Systemet tillader anvendelse af tyndere stenplader eller keramiske fliser, som ophænges på et aluminiumsskinnesystem bestående af krydsende skinner med specialdesignede vægholdere. Aluminiumsskinnesystemet kan fastgøres til mange forskellige overflader.

Ankrene monteres på forhånd i naturstenspladerne, hvorefter skinnesystemet monteres på f.eks. en betonkonstruktion. Herefter hægtes pladerne blot på skinnerne. Systemet er udført, så man ved at stille på nabopladerne kan løfte enkelte plader af. Justeringen sker med specialværktøj gennem de kun 8 – 10 mm brede fuger.

Bemærk at aluminiumssystemer i visse tilfælde ikke kan eftervises at opfylde BS-krav.



Fig. 16 Aluminiumsskinnesystem med fastgjort naturstensplade. Bemærk fastgørelsen til betonvæggen og naturstenspladen.

Systemet sætter få restriktioner til det arkitektoniske design. Ankrene kan næsten frit placeres et hvilket som helst sted på pladernes bagside, hvilket sikrer, at ophængningsystemet ikke er synligt i fugerne. Samtidig er det let at udskifte en enkelt facadeplade, f.eks. hvis den har en forkert nuance eller er skadet.

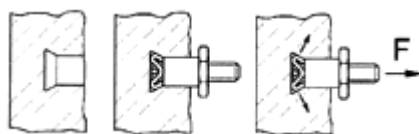


Fig. 17 Principskitse af fræset, undersænket hul.



Natursten – Dimensionering af facader

Teknikken med de undersænkede huller muliggør en høj maksimallast. Hvis ankrenes placering optimeres, kan bøjningsmomentet reduceres med helt op til 50%. Det er en medvirkende årsag til, at der kan anvendes facadeplader med en tykkelse helt ned til 20 mm.

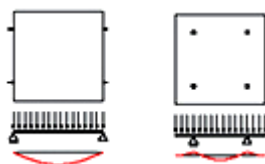


Fig. 18 Principskitse af traditionelle ophængningsystemer med dorne (t.v.) i forhold til ACT, hvor bøjningsmomentet er reduceret (t.h.) [Fischer 2006].

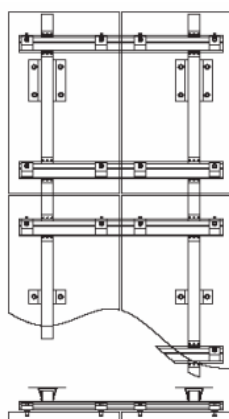


Fig. 19 udsnit af principskitse af skinnesystemet.

3.5.4 Skinnesystemer

Skinnesystemer anvendes til ophængning af mindre formater af natursten. Brugen af skinnesystemer giver en mere fastlåst opsætning end f.eks. opsætning med dorne. Der findes forskellige typer af skinnesystemer både i aluminium og rustfrit stål. Skinnesystemet placeres mellem den bærende konstruktion og naturstensfacaden.



Natursten – Dimensionering af facader

De lodrette skinner (kanalprofil) fastgøres til den bærende konstruktion i en sådan afstand, at det muliggør placering af isolering bag naturstenen. På de lodrette skinner monteres bæreskinner, som skal passe i størrelse til det spor, der er i naturstenen. Således placeres naturstenen oven på bæreskinne, så denne skjules delvist af stenen. Normalt anvendes skinneresystemer kun i de vandrette fuger.

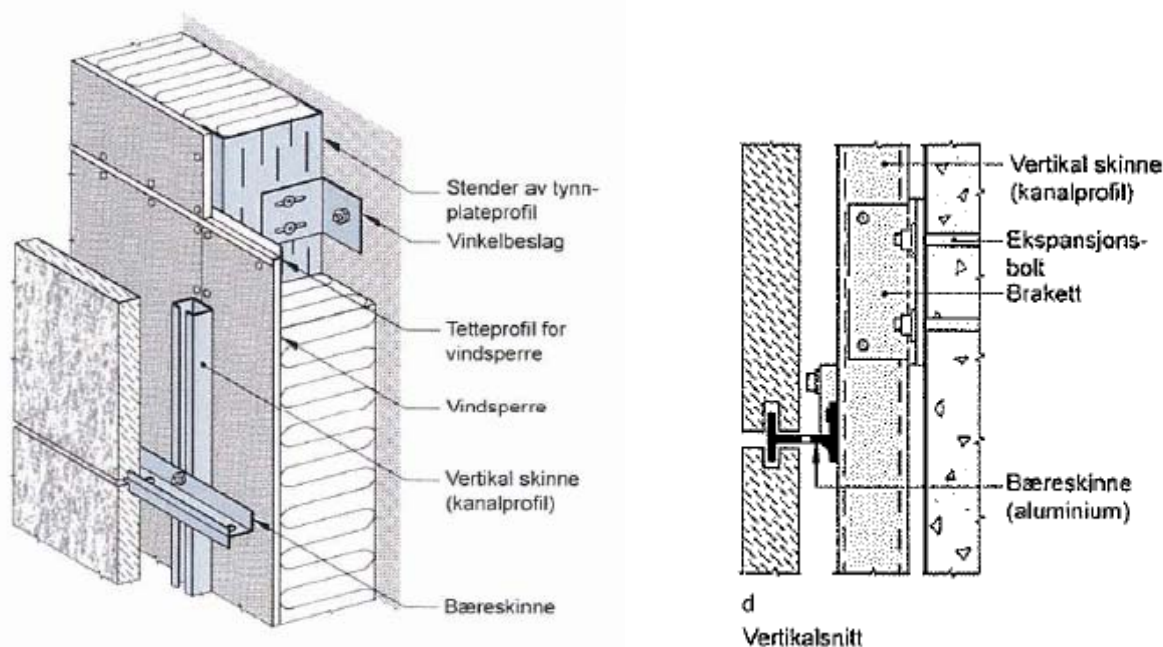


Fig. 20. Natursten opsat på skinneresystem og fastholdelse i fræset/skåret not i stenpladernes kanter.

3.5.5

Præfabrikerede ankre

Hvis det ønskes at anvende naturstensfacader på meget høje huse eller andre steder, hvor det kan være svært at komme til, kan det være en fordel at anvende større enheder opbygget som rammer med flere naturstensplader monteret på værksted.

Præfabrikationen kan for eksempel bestå i, at naturstenspladerne monteres direkte på et beton/stålelement eller et element af glasfiberarmeret polyester. Herefter løftes elementet inklusive naturstensplade på plads. Den type af præfabrikation muliggør ikke, at der er et ventileret hulrum mellem f.eks. betonelement og naturstensplader.