



Jordfugtig beton

Jordfugtig betontechnik – I teori og praksis

Jordfugtig beton

Jordfugtig betontechnik – i teori og praksis



Jordfugtig beton

Redigeret af: Jens Mouritsen Møller

Jordfugtig beton

Jens Mouritsen Møller, Aalborg Portland A/S

Jordfugtig Betonteknik 1. Udgave

Udgivet af Aalborg Portland 2021

Opsat hos MindthemediA ApS

Tryk: LaserTryk

Indholdsfortegnelse

Introduktion.....	1
Betonvarer af jordfugtig beton	2
CE-Mærkning af betonvarer	3
Belægningssten	3
Fliser	4
Kantsten	5
Letklinkerblokke	7
Kvalitet af betonvarer.....	10
Certificering ved tredjepartskontrol	10
Betonvarekontrollen.....	10
Forskellige betontyper til forskellige betonsegmente	12
Fabriksbeton.....	12
Betonelementer.....	13
Betonvarer af jordfugtig beton	14
Hvad adskiller jordfugtig – og blødstøbt beton?	16
Konsistens.....	16
Støbeteknik.....	19
Komprimering af Jordfugtig beton	19
Vibrering – Sætmålsbeton.....	21
Jutning - SCC Beton.....	22
Afformningstidspunkt.....	23
Formstabilitet - Jordfugtig beton	23
Afformningsstyrke - Blødstøbt beton.....	24
Relevante betonteknologiske begreber	26
Åbningstid.....	26
Varmeudvikling.....	26

Betonens styrker og svagheder	27
Armeret beton.....	30
Betonstyrke	31
Betonvarer styrkeegenskaber	33
Prøveemnets geometri.....	37
Styrkeudvikling.....	38
Vand – / Cementforhold	42
Betonrecepten og delmaterialer	46
Styringsparametre for jordfugtig beton	49
Tilslagsmaterialer	50
Pakningsgrad.....	51
Tilslagstyper	53
Størrelsesfordeling.....	55
Pakningsoptimering - Samlet kornkurve	58
Densitet og absorption.....	63
Fugtprocent.....	64
Frostbestandighed	64
Reaktiv kisel.....	65
Miljøpåvirkninger	66
Letklinker.....	67
Kornform.....	68
Størrelsesfordeling.....	68
Pakningsgrad.....	69
Densitet, styrke og absorption.....	69
Vand	70
Urenheder	70
Vandindhold.....	70
Cement.....	74
Fysiske og kemiske karakteristika	77
Finheden.....	77
Styrkeudvikling.....	78
Alkaliforbindelser	80
Tilsætningsstoffer	81
Acceleratorer.....	81

Vandafvisningsmiddel	82
Fortykkelsesmiddel	84
Luftindblandingsmiddel	84
Farvepigmenter	84
Plastificerende middel.....	85
Filler.....	85
Fysiske egenskaber	85
Kalkfiller.....	88
Flyveaske.....	89
Mikrosilica.....	94
Proportionering af betonrecept.....	95
Eksempel 1 – Tilslagsmateriale sammensætning	95
Eksempel 2 – Pastavolumen.....	97
Eksempel 3 – Kitmassens sammensætning.....	99
Eksempel 4 – Normeret betonrecept.....	101
Eksempel 5 – Blandesats og korrigeret vandindhold	102
Justering af recept.....	104
Skift af delmaterialer eller leverandør	104
Skift af tilslagsleverandør.....	105
Tilsætningsstoffer.....	105
Vandindhold	106
Tilslagsmaterialer	106
Pulverkombination.....	106
Produktionsafvigelser	108
Visuelt.....	108
Fødder.....	108
Skæg.....	110
Overfladebehandling med coating.....	111
Stenreder	113
Fremmedlegemer.....	114
Varierende geometri.....	118
Delaminering.....	122
Napning.....	124
Revner.....	125

Vand på uhærdnet beton	126
Kalkudfældninger	127
Primære udfældninger	131
Sekundære udfældninger	132
Reduceret risiko	134
Brune udfældninger	137
Produktkontrol	140
Godkendelse efter egenskaber	140
Godkendelse efter variabler	140
Styrkefamilier	141
Overfladefamilier	141
Prøvningshyppighed	141
Eksempel – Produktprøvning, Udseende, Kantsten af beton	141
Mærkning og deklarationer	143
Belægningssten, fliser og kantsten	143
Varer/Emballeringsenhed	143
Produktdeklaration/Handelsdokumenter	144
Betonbyggesten.....	144
Beskrivelse, betegnelse og klassificering.....	144
Eksempel – Produktdeklaration, Belægningssten iht.DS/EN 1338.....	145
Eksempel – Produktdeklaration, Byggesten iht. DS/EN 771-3.....	146
Mærkning af produkter.....	147
Arbejdssikkerhed	148
Ættsende	148
Sundhedsfare.....	149
Krom-neutralisering.....	149
Litteraturliste.....	151

Introduktion

Beton er det mest anvendte byggemateriale i verden. Det er bl.a. tilgængeligheden af delmaterialer, der gør det yderst aktuelt at anvende til byggeriet på verdensplan. Hvad gør beton til et godt byggemateriale, og er der begrænsninger på anvendelsen af betonen? De følgende afsnit omhandler udvalgte egenskaber, som er vigtige for at forstå betontechnologien, samt hvad materialet kan bruges til. Det er samtidig en introduktion til produktion og anvendelse af betonvarer i Danmark, som tager udgangspunkt i den historiske udvikling såvel som de teknologiske hovedpunkter. Afsnittet har bl.a. til formål at definere forskellen mellem almindelig blødstøbt- og jordfugtig beton samt de mest relevante betontechnologiske egenskaber for jordfugtig beton.



aalborgportland

CEMENTIR HOLDING

Betonvarer af jordfugtig beton

Jordfugtig beton anvendes til produktionen af en lang række produkter. Herunder ses eksempler på forskellige typer af betonvarer.



Figur 1 –
Eksempler på
betonvareprodukter
af jordfugtig beton:
1. Rør;
2. Kantsten;
3. Flise;
4. Letklinkerblok;
5. Belægningssten;
6. Udstøbningsblok

Denne bog vil primært omhandle belægningssten, fliser, kantsten og letklinkerblokke. Der dykkes bl.a. ikke ned i krav og specifikationer for produktion af følgende produkter.

- Udstøbningsblokke iht. DS/EN 15435
- Rør- og brøndgods iht. DS/EN 1916 & DS/EN 1917
- Overliggere af beton og letbeton iht. DS/EN 845-2
- Tagsten iht. DS/EN 490

Proportioneringsprincipperne for jordfugtige betonrecepter er dog stadig yderst relevante for flere af de nævnte produkttyper, men dog ikke udtømmende.

CE-Mærkning af betonvarer

I Europa er betonvarer omfattet af en række standarder, som sikrer en ensartet kvalitet af produkterne. Producenterne skal derfor overholde kravene iht. de gældende standarder for at kunne CE-mærke deres produkter. Dette giver retten til frit at sælge og levere produktet i alle EU-landene uden yderligere krav om national prøvning og godkendelse [2]. De enkelte EU-lande, kan dog have nationale bestemmelser, som skærper kvalitetskravene i det pågældende land.

- Belægningssten

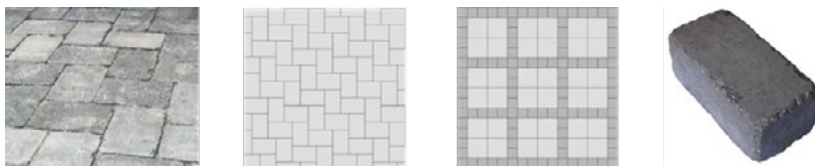
I Europa er belægningssten omfattet af den gældende standard DS/EN 1338. I standardens pkt. 3.2 angives en definition af hvad en betonbelægningssten er, se herunder.

- Stenens totallængde divideret med dens tykkelse er mindre end eller lig med fire.
- Intet tværprofil har et vandret mål, som er mindre end 50mm, i en afstand 50mm fra enhver kant.

Et eksempel på dette kunne være, at tykkelsen for en belægningssten med en totallængde på 200mm skal være mindst 50mm.

Form, udseende og udlægningsmønster kan laves stort set efter kundens ønsker. Det kan dog være nødvendigt at lave enkelte modifikationer, for at gøre produktionen af stenene mulig. Eksempler på nogle de danske producenters produkter ses herunder.

Figur 2 –
Belægningssten,
RC Beton



Figur 3 –
Belægningssten,
RC Beton



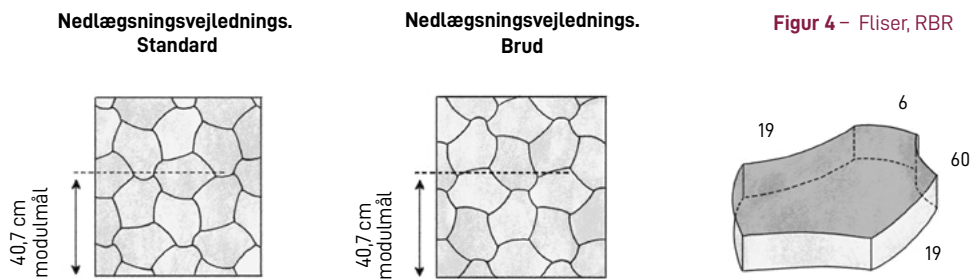
Fliser

I Europa er fliser omfattet af den gældende standard DS/EN 1339. I standardens pkt. 3.2 angives en definition af hvad en betonflise er, se herunder.

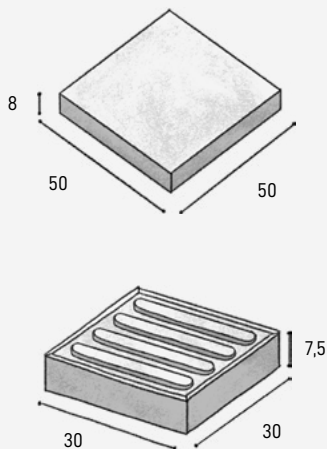
- Totallængden overstiger ikke 1m
- Totallængde divideret med tykkelse er større end fire.

Et eksempel på dette kunne være, at tykkelsen for en flise med en totallængde på 1m skal være mindre end 250mm.

Form, udseende og udlægningmønster kan laves stort set efter kundens ønsker. Det kan være nødvendigt at lave enkelte modifikationer, for at gøre produktionen af stenene mulig. Eksempler på nogle de danske producenters produkter ses herunder.



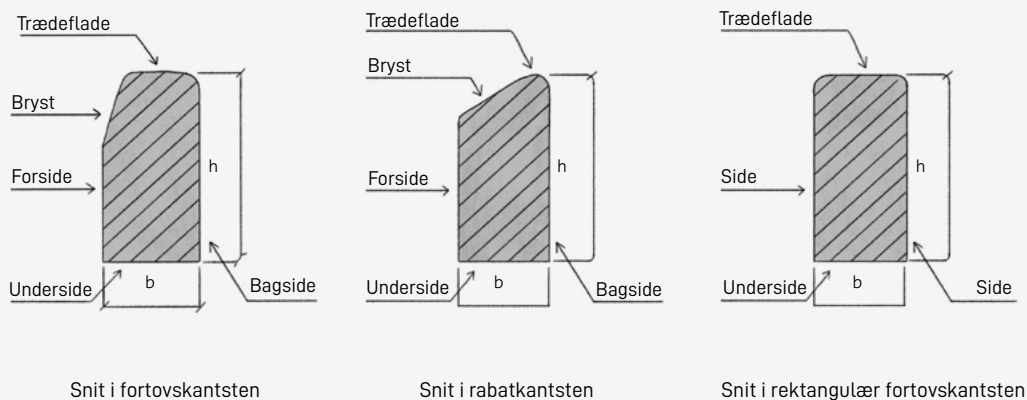
Figur 4 - Fliser, RBR



Figur 5 - Fliser, IBF

- Kantsten

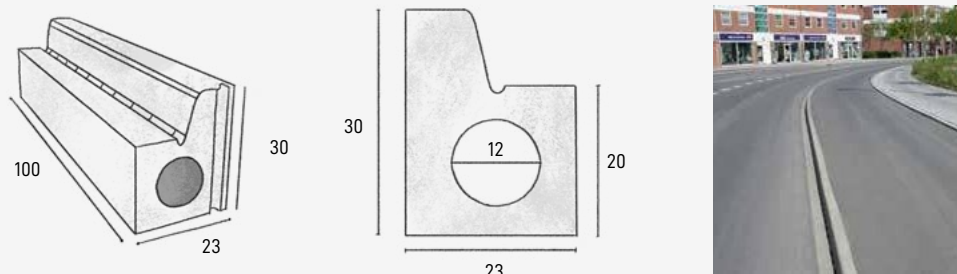
I Europa er kantsten omfattet af den gældende standard DS/EN 1340. I standarden er der angivet tre eksempler på typiske kantstenstværnsnit, se figur herunder.



Figur 6 – DS/EN 1340, Nationalt Anneks, pkt. 5.2.1

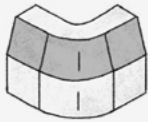
Kantsten kan produceres med forskellige radier, dimensioner, affasninger mm. I figur 7 ses eksempler på udformninger af forskellige typer af kantsten fra nogle af de danske producenter.

Udover de typiske udformninger af kantsten findes der også produkter, som løser behovet for adskillelse mellem vej og fortov, kombineret med løsninger på andre problematikker, f.eks. æstetiske afvandingsystemer.



Figur 8 – Eksempel på afvandingskantsten, IBF [5]

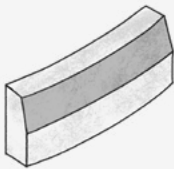
Fortovskantsten



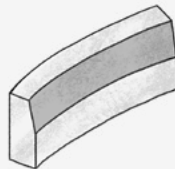
Udvendigt hjørne



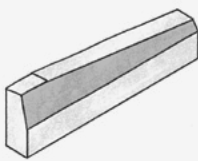
Indvendigt hjørne



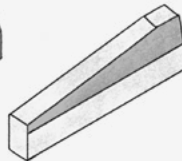
Udvendig radius



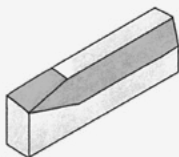
Indvendig radius



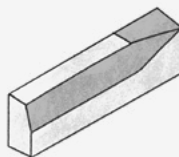
Dybkansten



Dybkansten højre

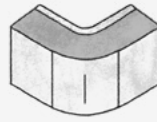


Rabat > overgang

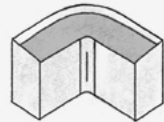


Overgang > rabat

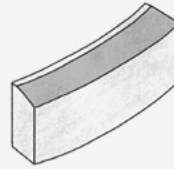
Rabatkantsten



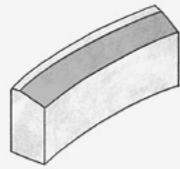
Udvendigt hjørne



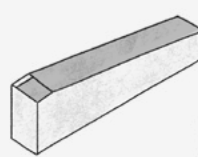
Indvendigt hjørne



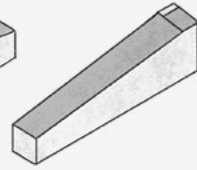
Udvendig radius



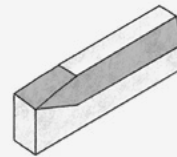
Indvendig radius



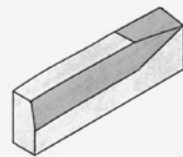
Dybkansten



Dybkansten højre



Rabat > overgang



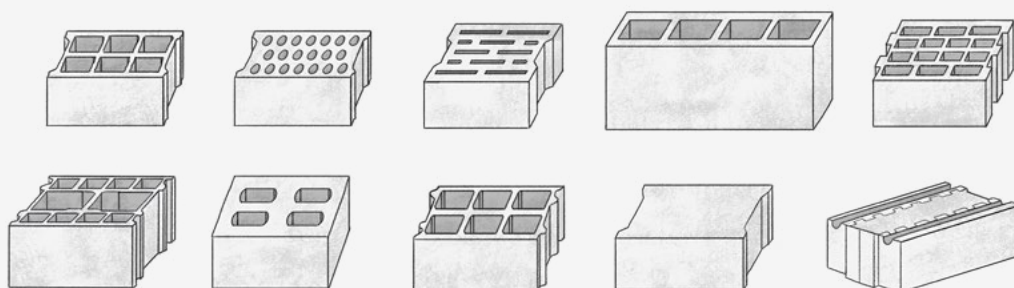
Overgang > rabat

Figur 7 – Eksempler på kantsten, RC Beton [4]

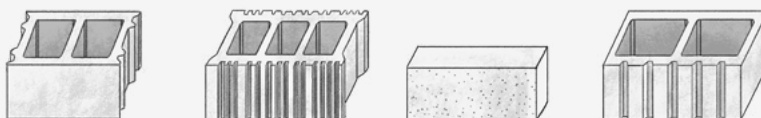
- Letklinkerblokke

Letklinkerblokke hører under kategorien byggesten til murværk. I Europa er byggesten til murværk omfattet af den gældende standard DS/EN 771-3. I standardens Anneks C angives nogle eksempler på, hvordan udformningen af en byggesten kan se ud, se figur 9.

a) Common masonry units



b) Facing and exposed masonry units



c) Accessory units



Figur 9 - Eksempler på byggesten iht. DS/EN 771-3

I Danmark ses ofte massive blokke af letklinkerbeton med og uden isoleringsmaterialer, se første figur fra venstre i kategori b), se figuren ovenfor. Enkelte producenter tilbyder også perforerede blokke kombineret med isolering. Dette kan øge bæreevnepotentialet for konstruktionen, da armeringen herved kan placeres horisontalt og vertikalt. Eksempler på forskellige produkter ses herunder.

1.



2.



3.



4.



Figur 10 – Eksempler på letklinkerblokke fra danske producenter: 1. RC Beton - Kælderblok; 2. Skagen Beton - Indvendig Skawblok; 3. IBF LecaTerm blok; 4. Leca Rilleblok.

Kvalitet af betonvarer

For at kunne opnå CE-mærkning af betonvarer, skal producenterens produktion være i overensstemmelse med de gældende standarder for de enkelte betonvareprodukter, hvoraf nogle er nævnt i afsnittet omkring CE-mærkning af betonvarer. CE-mærkning viser desuden at producenterne overholder EU's krav om sikkerhed, sundhed og miljøbeskyttelse.

Certificering ved tredjepartskontrol

Vælger betonvareproducenterne at blive certificeret gennem tredjepartsovervågning, indebærer det en løbende auditering. Tredjepartskontrollen sikrer at betonvareproducenten overholder kravene iht. de gældende standarder og har beskrevet de relevante procedurer mht. sikkerhed og kvalitet i produktionen. Der findes alternativer til tredjepartskontrollen, som varierer afhængigt af de produkter, som produceres. Et alternativ til tredjepartsovervågning er leverancekontrol, hvor kunde og producent i et samarbejde inspicerer stikprøver af de leverede produkter. Der foretages her undersøgelser både visuelt og senere testes de for andre egenskaber. Det er en stor tradition for tredjepartsovervågning i Danmark og det er samtidig den mest anvendte form for kontrol.

Der findes en række forskellige muligheder for tredjepartsovervågning, såsom Dancert og Bureau Veritas, der kan vurdere overensstemmelse af de givne produktkrav. Tredjepartsovervågningen betyder at der regelmæssigt vil være auditering af virksomheden. Under denne auditering kan alle medarbejdere, som er en del af produktionen, blive bedt om at gengive virksomhedens processer for bl.a. prøveudtagning, kassation af fejlproduktioner mm. Det er derfor vigtigt at medarbejderne har kendskab til de gældende produktstandarder men vigtigst af alt, de interne processer, som skal sikre at standarden overholdes.

Betonvarekontrollen

Udover produktstandardernes krav er der i Danmark en lang tradition for at sikre en høj kvalitet i betonvareproduktionen. Traditionen stammer tilbage fra 1905, hvor en række betonvarefabrikker indgår et samarbejde om at danne et kvalitetsmærke for betonvareprodukter. På dette tidspunkt byggede kvalitetsmærket på et mindstekrav til cementindhold angivet som blandingsforholdet mellem cement: tilslag på minimum 1:3 og 1:2,5 eller bedre

[44]. Fabrikkerne måtte dog erkende at kravet til cementindholdet ikke var tilstrækkeligt. Gennem en længere årrække blev der derfor udviklet en mere officiel kontrolordning. Et samarbejde mellem Stads- og Havneingeniørforeningen, Landsforeningen for Dansk Betonvareindustri og Cementfabrikkernes Tekniske Oplysningskontor CTO v. Aalborg Portland, påbegyndte i sommeren 1941 arbejdet med at udarbejde vedtægter og kontrolregler. Den 7. november 1941 blev reglerne underskrevet. Betonvarekontrollen "BVK" var nu en realitet. Siden dengang har BVK i form af BVK-trekanten været et kvalitetsstempel for betonvarer som bærer mærket.

FIGUR 11 –
Betonvare-
kontrollens
Trekantmærke og
kvalitetsstempel
[44].



I dag er der kun enkelte producenter, som ikke lader sig tredjepartsovervåge af BVK. De virksomheder, som er medlemmer af BVK, får nemlig adgang til et fagligt fællesskab og vejledning til produktion af god kvalitet igennem BVK's kvalitetsmanual. Kontrolreglerne i manualen er væsentlig mere omfattende end de underliggende standarder, og er med til at sikre at betonvareproducenterne opretholder en høj kvalitet, samt overholder skærpede krav til de nedenstående processer.

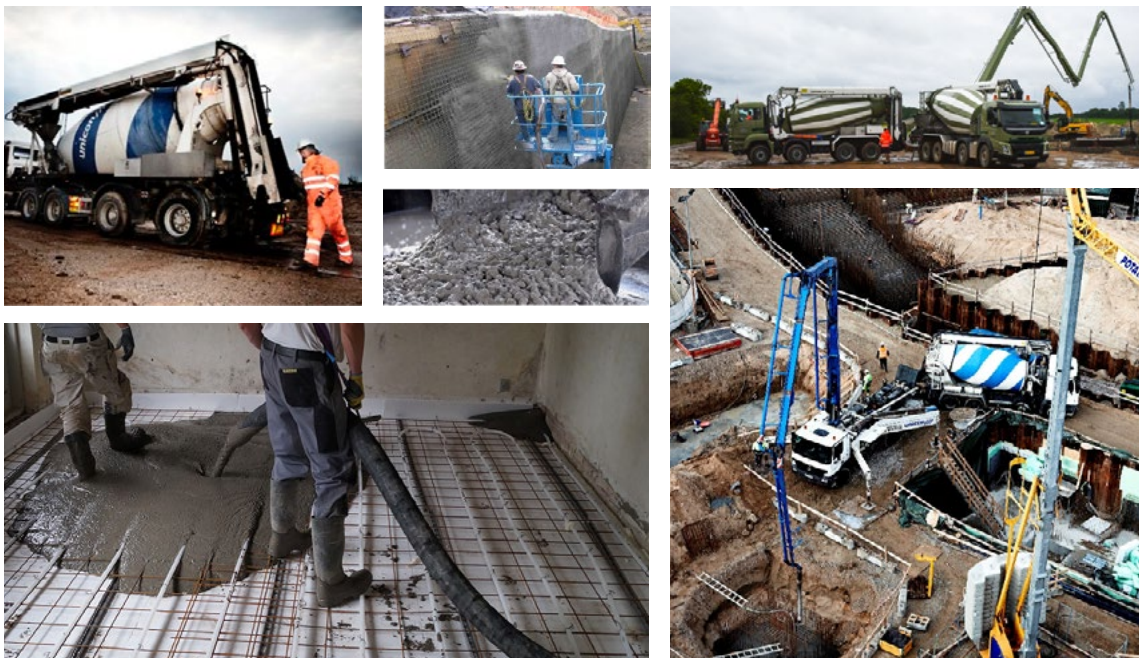
- Personale
- Indkøb
- Deklarationer
- Produktion
- Proceskontrol
- Produktionskontrol
- Inspektions-, måle - og prøvningsudstyr
- Mærkning
- Afvigende forhold
- Levering

Forskellige betontyper til forskellige betonsegmente

Fabriksbeton

Fabriksbeton benævnes også færdigbeton eller RMC (Ready Mixed Concrete). Det er den mest producerede betontype i Danmark. Denne type beton produceres på fabrikken, hvorefter betonen transporteres ud til byggepladsen i roterbiler. Fabriksbeton anvendes til alle typer af betonkonstruktioner såsom, fundament, dæk, vægge, søjler og bjælker. Herunder er et par af de egenskaber, som er vigtige for kvaliteten ved produktion af fabriksbeton.

Betonen skal have den ønskede bearbejdelighed ved udstøbning på byggepladsen. Sædvanligvis skal betonen kunne bevare sin bearbejdelighed i 90 modenheds minutter. Ønsket om en let bearbejdelig beton gør det oplagt at anvende blødstøbte betoner som f.eks. sætmålsbeton eller SCC-beton (selvkomprimerende beton).



Figur 12 – Eksempler på In-situ støbninger med fabriksbeton

Betonelementer

I Danmark er betonelementer et af de tre største segmenter i betonbranchen. I en betonelementproduktion foregår alt internt på fabrikken lige fra blandeproces, forarbejde, armeringsarbejde, udstøbning og afformning. Eksempler på typiske betonelementer er huldæk, søjler, bjælker og vægge. Disse elementer leveres på byggepladsen og monteres med kran.



Figur 13 – Eksempel på elementproduktion, lager og montering

Betonelementproduktion består af en række fortløbende processer, startende med opbygning af form, armering, udstøbning, og for facader isolering, yderligere armering og ny udstøbning. Herefter følger pudsning eller anden overflade finish samt evt. afdækning med plast eller isolerende måtter. For at kunne opretholde en døgn-cyklus, skal betonelementerne kunne afformes

efter typisk 16 - 18 timer, hvorefter processen starter forfra. Det er betonens sammensætning og lagringsforholdene, som styrer start – og sluttidspunktet for disse processer. Herunder er nogle af de egenskaber, som er vigtige for kvaliteten og processtyringen ved produktion af betonelementer.

- Tidligt glittetidspunkt
- Høj tidlig styrke
- Bearbejdelighed

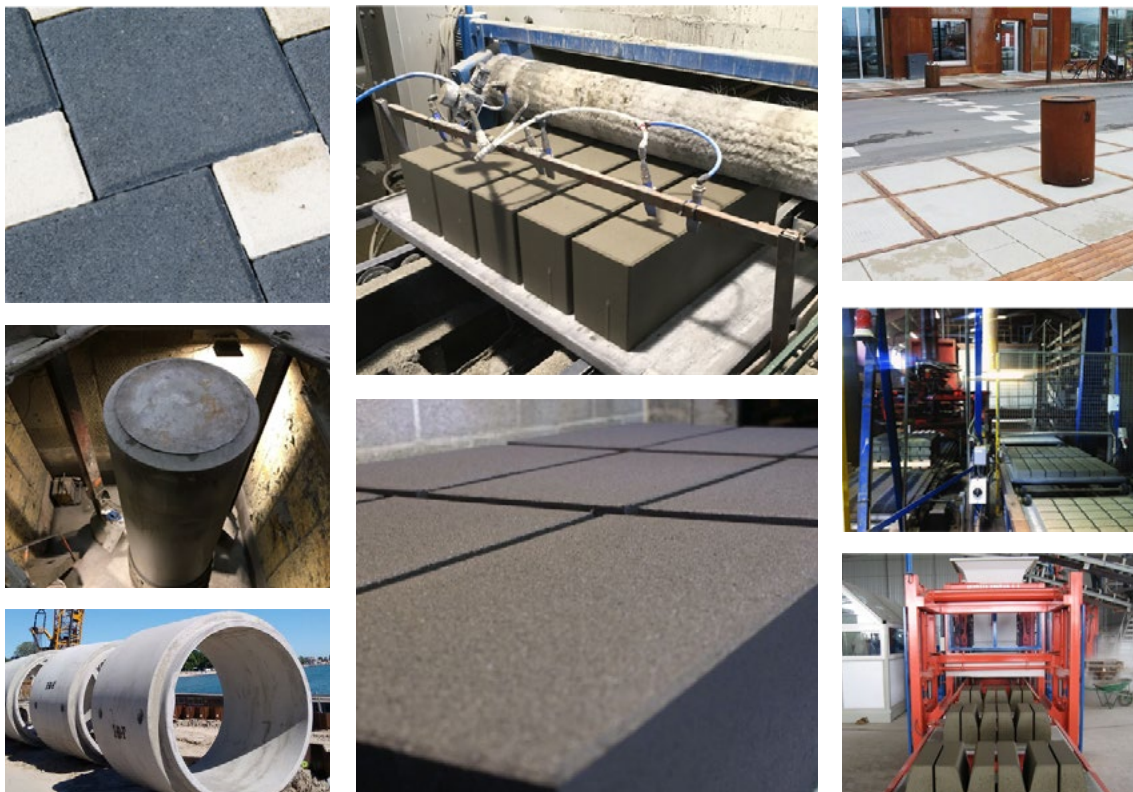
Ved at anvende SCC betoner reduceres arbejdstiden til udstøbningsprocessen. Det er også nemmere at sikre en god omslutning af armeringen i betonelementerne, fordi betonen har gode flydeegenskaber. Herudover har anvendelse af SCC haft stor betydning for arbejdsmiljøet i elementproduktionen - mindre hårdt fysisk arbejde og et væsentligt lavere støjniveau fra vibratorer. Derfor er blødstøbt beton ofte anvendt i elementproduktionen med undtagelse af huldækproduktion. Til huldækproduktion anvendes en jordfugtig beton, som er formstabil direkte efter at den er ekstruderet ud gennem den ønskede form på maskinen. Tidlig styrke- og glittetidspunkt reducerer ventetiden i produktionen og er derfor helt essentielle egenskaber for betonelement segmentet. Huldæk produceres med forspændte armerings liner. Styrken er derfor kritisk for hvornår linerne kan kappes. Hvis linerne kappes inden betonen har opnået den nødvendige styrke, vil de ødelægge elementet. For slapt armerede vægelementer produceret med blødstøbt beton, har styrken betydning for hvornår elementet kan afformes.

Betonvarer af jordfugtig beton

I Danmark er betonvarer et af de tre største segmenter i betonbranchen. Ligesom for betonelement produktionen foregår al betonvareproduktion internt på fabrikken. Betonvarer adskiller sig ved at anvende en jordfugtig beton, hvor vandindholdet af betonen er mellem 20 - 40% mindre end i blødstøbt beton. Den jordfugtige tilstand øger friktionen imellem partiklerne, hvilket betyder at det kræver en stor mængde energi for at kunne komprimere betonen i formen. Den jordfugtige betons sammensætning gør, at flere principper fra den blødstøbte betontechnologi er forskudt fra principperne for den jordfugtige betontechnologi, med et øget fokus på komprimering og formstabilitet. Herunder er der nogle eksempler på vigtige egenskaber for betonvarer af jordfugtig beton.

- Styrke
- Formstabilitet
- Overfladeudseende

Den omtalte produktionsproces, hvor produktet afformes umiddelbart efter støbning, kræver, at betonen ikke falder sammen efter afformning. Det er derfor kritisk for kvaliteten af produktet, at betonen er formstabil efter komprimering. Kundernes opfattelse af produktkvalitet afhænger mest af betonens udseende. Produkter, som har udfældninger, variationer i farve og overfladestruktur opfattes som en variation i kvalitet hos kunderne. En anden vigtig parameter er at bøjningsstyrken på produkterne er svarende til den deklarerede styrke. Kvaliteten kontrolleres ved visuel inspektion, nøje styring af betonens sammensætning og efterfølgende måling af opnåede betonegenskaber på stikprøver.



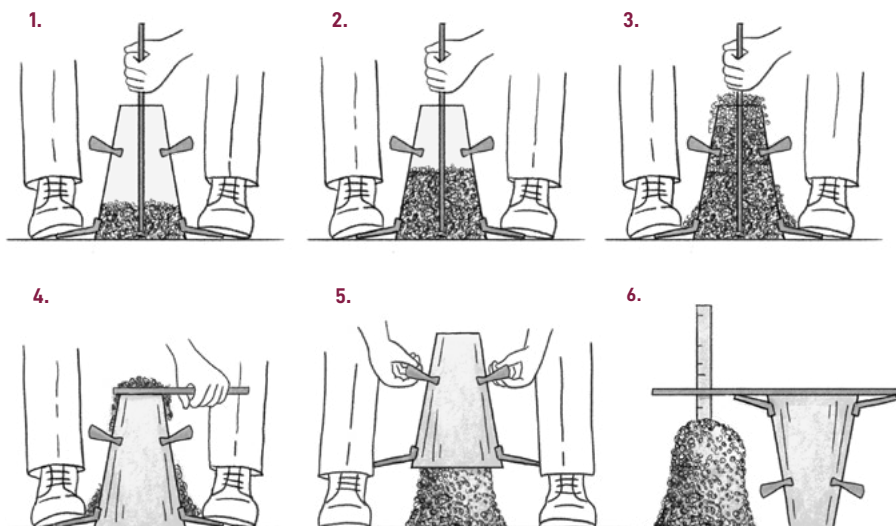
Figur 14 – Eksempler på betonvarer af jordfugtig beton

Hvad adskiller jordfugtig – og blødstøbt beton?

Dette afsnit omhandler egenskaber, der adskiller jordfugtig – og blødstøbt beton fra hinanden og hvad de har til fælles.

Konsistens

Konsistens af beton kan nemt illustreres ved en sætmålstest. Denne test beskriver hvor stiv betonen er. Stivheden af beton siger noget om, hvor meget energi der skal tilføres for at sætte partiklerne i bevægelse og gøre betonen bearbejdelig. Denne energi kan komme fra f.eks. tyngdekraften, vibrationer eller komprimering. Dette tilføres betonen vha. formvibrator, bjælkevibrator, stavvibrator eller ved manuel stampning. En illustration af et sætmålsforsøg er vist på figuren herunder.



Figur 15 – Illustration af sætmålsforsøg. Trin 1-6 udføres iht. prøvningsstandarden DS/EN 12350-2.

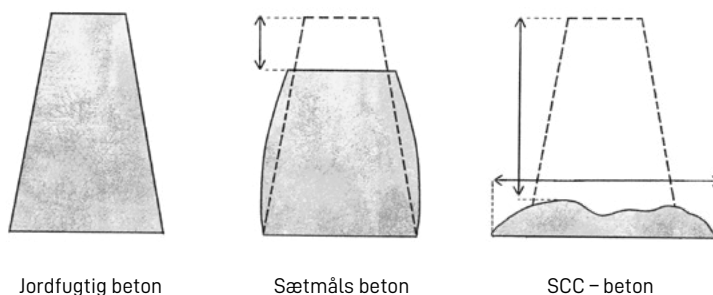
Denne testmetode anvendes ikke til prøvning af egenskaber i jordfugtig beton og SCC beton.

En jordfugtig beton vil ikke sætte sig når sætmålskeglen løftes. Derfor kaldes jordfugtig beton også for "zero slump concrete" på engelsk, som betyder "beton uden sætmål". For at måle forskel i bearbejdelighed for jordfugtige

betoner, bør der altså anvendes en anden test, hvor der i stedet undersøges komprimeringsevnen af betonen. Dette kan testes ved at anvende en standardiseret metode iht. EN 12350-3 Vebeprøvning. Alternativt kan komprimeringsevnen måles i en såkaldt ICT (Intensive Compactor Tester).

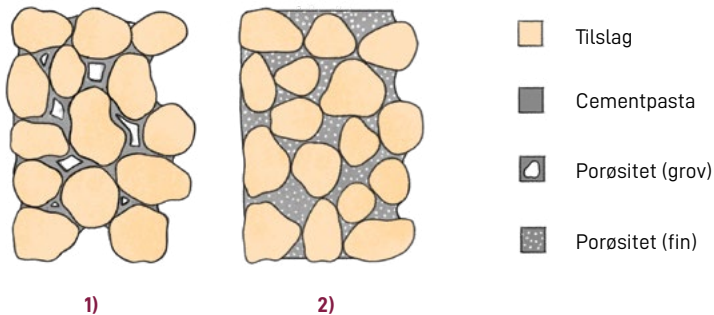
På figuren herunder ses hvordan jordfugtig beton opfører sig i en sætmålstest, sammenlignet med andre betontyper, efter at keglen er løftet.

Figur 16 –
Forskellige konsi-
stenstyper, vist ved
en sætmålstest



Den jordfugtige beton har en høj stivhed, fordi den har et lavt pastaindhold. Pastaindholdet i beton kan kort sagt beskrives som cement + vand + finstoffer. Betydningen af det lave pastaindhold kan illustreres ved, at der ikke er nok pasta til at udfylde hulrummet mellem tilslagspartikler. Pastaen fungerer som smøremiddel imellem tilslagspartiklerne. Ved et lavt indhold af pasta øges friktion imellem tilslagspartiklerne, og betonen bliver derved stivere. Betonens stivhed og lave indhold af pasta gør at en jordfugtig beton har en grovere porøsitet sammenlignet med en blødstøbt beton. På figur 17, ses et eksempel på forholdet mellem tilslagspartikler, pasta og porøsitet for en jordfugtig- og blødstøbt beton, hvis betonerne betragtes igennem et mikroskop.

Konsistensen kan altså kontrolleres ved at regulere på pastaindholdet, hvor f.eks. et øget pastaindhold giver et øget sætmål. En måde at skelne mellem de forskellige betontyper, er at inddele dem i tre konsistenstyper, nemlig jordfugtig-, sætmåls- og SCC-beton. Der findes en anbefaling for hvornår en beton tilhører en bestemt konsistensklasse, f.eks. sætmålsmetoden i Danmark anbefalet til betoner med et sætmål mellem 10 og 210 mm. Opdeling af betontyperne kunne derfor være at opdele dem efter det forventede sætmål (S).



Figur 17 – Illustration af jordfugtig beton 1) og blødstøbt beton 2).

- Jordfugtig beton $000 \text{ mm} \leq S = 000 \text{ mm}$
- Blødstøbt sætmålsbeton $010 \text{ mm} \leq S \leq 210 \text{ mm}$
- Blødstøbt SCC-beton $210 \text{ mm} < S$

I Danmark anvendes en anden testmetode til at måle konsistensen på SCC betoner, hvor det såkaldte "flydesætmål" måles. Flydesætmålet måles iht. den gældende standard EN 12350-8, hvor diameteren af betonens udbredelse måles. Flydesætmålet kaldes på engelsk for "slumpflow" og forkortes "SF". Et eksempel på dette vandrette mål er givet på figuren hvor de forskellige konsistenstyper er forklaret.

Der kan ofte med en simpel visuel vurdering skelnes mellem de nævnte konsistens kategorier da forskellene mellem SCC-beton, sætmålsbeton og jordfugtig beton er tydelig. Et eksempel på betonernes udseende ses herunder.

I den blødstøbte beton er mængden af pasta så stor at den udfylder hullrummene imellem tilslagene. Pastaen reducerer dermed friktionen mellem betonens tilslagspartikler. Den blødstøbte beton indeholder overskud af



Figur 18 – Eksempler på konsistens kategorier. Tv. Jordfugtig støbt beton; Mf. Sætmålsbeton; Th. SCC

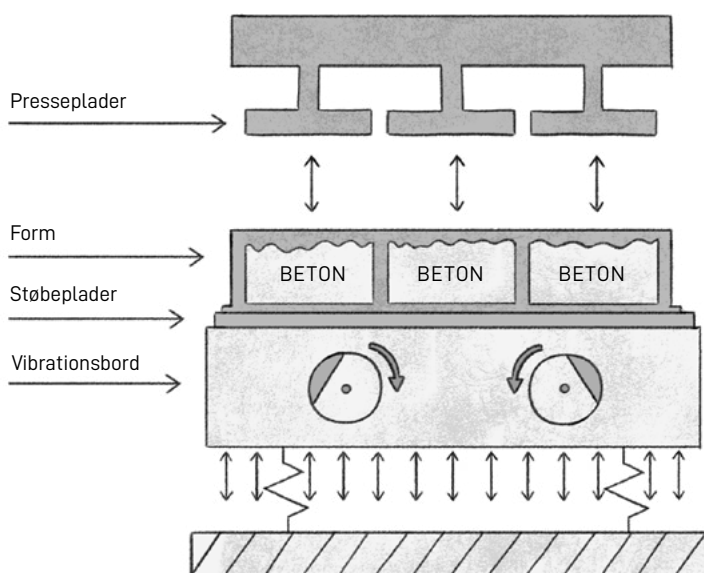
pasta så tilslagspartiklerne kan bevæge sig mellem hinanden. Ved at variere mængden af pasta kan der opnås forskellige egenskaber mht. konsistens og flydeegenskaber. I en SCC-beton er det dog ikke tilstrækkeligt at øge pastaen alene. Der må også anvendes et tilsætningsstof, som reducerer overfladekræfterne mellem cementpartiklerne. Herved reduceres vandbehovet ved at øge partiklernes evne til at bevæge sig imellem hinanden. Dette tilsætningsstof kaldes for superplast og skal doseres som en %-del af finstofpartiklerne i betonen.

Støbeteknik

I anvendelsen af jordfugtig – og blødstøbt beton benyttes flere forskellige støbeteknikker. Den valgte støbeteknik vælges ud fra produktets udformning, tilgængelige maskiner og betonens konsistens mm. Nogle af de mest anvendte støbeteknikker f.eks. komprimering, vibrering og jutning, vil blive introduceret i dette afsnit.

– Komprimering af Jordfugtig beton

Produkter af jordfugtig beton støbes ved en kombination af komprimering under højt tryk og vibrationer. Dette er en unik produktionsmetode, som er hyppigt anvendt i Danmark. Herunder ses et eksempel på en blokstensmaskine, som komprimerer og vibrerer beton ned i formen.



Figur 19 – Princippet for fremstilling af betonvarer med jordfugtig beton [14].

Den jordfugtige beton blandes og fyldes herefter i støbeformen. Fyldningen er helt essentiel for produktkvaliteten. Hvis der fyldes ensartet for meget, bliver produktet for højt og visa versa. Hvis der fyldes uensartet, varierer komprimeringsgraden i de enkelte celler, og man får dårligere komprimering og dermed lavere styrker i de celler der er fyldt mindst. Pressepladerne komprimerer betonen imens den vibreres vha. vibrationsbordet. Der kan justeres på trykpåvirkning fra pressepladerne, samt amplitude og frekvens på vibrationsbordet. Dette er nødvendigt for at maskinen kan tilpasses forskellige betonsammensætninger og produktdimensioner. Herunder ses et eksempel på en støbeform og tilhørende presseplade.



Figur 20 –
Støbeform til
fremstilling af
100 x 200 x 60 mm
betonsten [14].

Ved produktion og støbning af betonvarer af jordfugtig beton, kan det være nødvendigt at inddеле den jordfugtige beton i tre stadier afhængigt af pastamængden. De tre stadier er hhv. "**tør**", "**fugtig**" og "**våd**" [39].

En tør jordfugtig beton er karakteriseret ved at der ikke er nok pastavolumen, til at dække alle partiklerne. Det manglende pastavolumen nedsætter pakningsegenskaberne i den jordfugtige beton og mindre variationer eller ændringer i delmaterialer vil ikke have nogen ændring på pakningsegenskaberne. En tør jordfugtig beton vil ofte være porøs, samt have lav densitet og styrke.

En fugtig jordfugtig beton er optimum for produktion af betonvarer og karakteriseres ved at der er tilstrækkeligt med pastavolumen til at dække alle tilslagskorn og skabe den kuglelejeeffekt som kan ændre pakningsegenskaberne. I dette stadie vil ændringer og variationer i betonens vandindhold også ændre betonens pakningsegenskaber og betonen kan derfor optimeres.

En våd jordfugtig beton kan karakteriseres ved at det såkaldte "slamlag" kommer til syne på overfladen. Ifølge undersøgelser vist i [39] er pasta-volumen i den jordfugtige beton så stort at mætningsgraden af det totale hulrumsvolumen iblandt delmaterialernes partikler er større end 90%. I dette stadie vil et øget vandindhold ikke have nogen positiv effekt på betonens pakningsegenskaber og en overdosering kan bidrage til dårligere formstabilitet.

Det er forholdsvis let at lave betonvarer med en tør beton, som har en visuelt godkendt overflade. Det er dog vigtigt at bemærke at andre egenskaber som f.eks. mekanisk styrke øges jo mere betonen kan komprimeres. Kunsten er altså at lave jordfugtig beton der er så våd som muligt, uden at ødelægge formstabiliteten eller forårsage napping i overfladen.

– Vibrering – Sætmålsbeton

Vibrering anvendes typisk til sætmålsbeton. Flydespændingen i denne beton gør, at det er nødvendigt at tilføre energi i form af vibrationer for at løsne tilslagspartiklerne fra hinanden. Når blødstøbt sætmålsbeton blandes, opstår der en mængde grov porøsitet i form af luft i betonen. Hvis ikke betonen vibreres under støbningen, indkapsles den grove luft i betonen og styrken reduceres. Derudover øges risikoen for at armeringen ikke omslutes totalt. Begge problematikker er potentielt med til at reducere holdbarhed og bæreevne af betonkonstruktionen. Vibrering af en sætmålsbeton udføres med et redskab, som passer til konstruktionens udformning. Til udførsel af vægkonstruktioner anvendes der ofte en stavvibrator, hvor der til gulvkonstruktioner med store overflader kan anvendes en bjælkevibrator. Eksempler på redskaberne ses herunder.



Figur 21 – Eksempel på vibrationsredskaber. Tv. Stavvibrator; Th. Bjælkevibrator

■ Jutning - SCC Beton

Formålet ved SCC-beton er at reducere arbejdsbyrden i forbindelse med støbearbejdet. Dette opnås ved at designe betonen til at have gode flydeegenskaber. SCC-beton anvendt til forskellige formål kræver dog stadig differentierede flydeegenskaber. Derfor vil der være forskel på en SCC-gulvbeton og en SCC-vægbeton.

Ved gulvstøbninger anvendes der ofte SCC-betoner med lave flydesætmål ($SF < 600$ mm). SCC-egenskaberne i betoner med lave flydesætmål, gør at betonen selv omslutter armeringen og smider det grove luft fra blandeprocessen. Betonen er dog ikke selvnivellerende og kan derfor ikke selv skabe helt plane overflader. Derfor kan der ved støbning af gulvkonstruktioner i SCC-beton med lave flydesætmål, anvendes en jutter. En jutter fungerer ved at et rør bevæges i små bølgebevægelser. Bevægelserne tilfører en tilstrækkelig mængde energi til betonen, så pastaen lige nøjagtig dækker stenene og skaber en jævn overflade. Et eksempel på jutter og anvendelsen på betonoverflader ses herunder.



Figur 22 – Eksempler på jutning og SCC-beton [15]

Ved støbningen af vægkonstruktioner anvendes der ofte en SCC-beton med højt flydesætmål ($SF > 600$ mm) for at undgå luftbobler i overfladen.

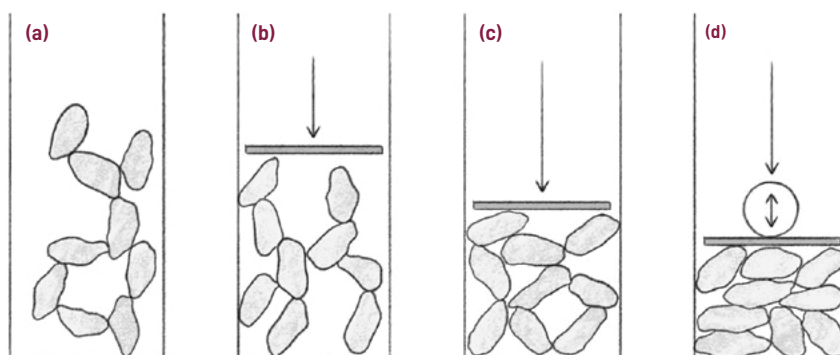
Afformningstidspunkt

Forskellen i betonsammensætningen af jordfugtig - og blødstøbt beton giver producenterne forskellige muligheder mht. afformning. Ved produktion jordfugtig-, element- og fabriks beton er der fokus på forskellige betonegenskaber når det kommer til afformningstidspunktet.

Formstabilitet - Jordfugtig beton

I en betonvareproduktion transporteres den jordfugtige beton ofte direkte ind i hærdekammeret på samleband efter støbningen. Det er derfor vigtigt at den friske beton er stabil direkte efter støbning.

Ved komprimeringen og vibrering af jordfugtig beton, tilføres der nok energi til at overvinde den indre friktion, hvorved betonen komprimeres. Partiklerne pakkes herved tættere imellem hinanden og derfor øges sammenhængskraften i betonen. Efter vibrering og komprimering af betonvarer opnås derfor en formstabil tilstand i den friske jordfugtige beton. Denne proces, sammen med de indre overfladespændinger i pastaens indhold af cement og andre finstofpartikler, gør det muligt at afforme, håndtere og transportere betonvarer af jordfugtig beton direkte efter støbning uden at produktet går i stykker under processen. Et eksempel på komprimering og vibrering er vist herunder.



Figur 23 – Eksempel på pakning af partikler ved komprimering. a) Løst lejrede partikler i en beton efter blanding. b) og c) partiklerne i betonen komprimeres ved øget presstykk indtil betonen begynder at gøre modstand og volumen ikke formindskes yderligere. d) Herefter anvendes vibration og komprimering til at øget tætheden mellem partiklerne.

Formstabilitet i jordfugtig beton kan altså opnås direkte efter blandeprocessen afsluttes, mens det for blødstøbt beton kan vare flere dage. I figur 24 ses

det hvordan en typisk jordfugtig beton bevarer formen efter at være trykket sammen i håndfladen.



Figur 24 – Eksempel på komprimering og formstabilitet af jordfugtig beton

Betonens formstabilitet afhænger bl.a. af delmaterialernes overfladestruktur, pastavolumen mm. Variationer i delmaterialerne vil derfor have stor betydning for produktion af betonvarer, da det kan betyde at produkterne bliver enten for bløde eller ikke kan komprimeres tilstrækkelig.

– Afformningsstyrke - Blødstøbt beton

I modsætningen til jordfugtig beton, kan blødstøbt beton ikke afformes direkte efter støbning. Her støbes betonen ud i en form og skal kunne bære sin egenvægten samt de aktuelle ydre belastninger før betonen kan afformes. Afformningstidspunktet for blødstøbt beton afhænger derfor af hvornår betonen har udviklet en passende afformningsstyrke. Den nødvendige styrke bestemmes af konstruktionens udformning, mens hastigheden af styrkeudviklingen kan justeres ved at ændre betonsammensætningen og lagringsforholdene. Standarden IS 456:2000 [16] giver et eksempel på hvor lang tid betonen skal hærde for at have opnået en tilstrækkelig styrke og formstabilitet.

I figur 25 vises der et eksempel, der udgangspunkt i fabriksbeton anvendt til insitu støbninger.

Formtype	Minimum hærdetid inden afformning
Vertikal f.eks. søjler, vægge, bjælker	16-24 timer
Dæk i etageadskillelser ¹⁾	3 dage
Bjælker i etageadskillelser ¹⁾	7 dage
Dæk i etageadskillelser ²⁾	
a) Spænd op til 4.5m	7 dage
b) Spænd over 4.5m	14 dage
Bjælker i etageadskillelser ²⁾	
a) Spænd op til 6 m	14 dage
b) Spænd over 6 m	21 dage

Figur 25 – IS 456:2000 pkt. 11.3.1 [16] 1) Konstruktionen forbliver understøttet af f.eks. soldater, og kun formpladen fjernes. 2) Både formplade og understøtningen af f.eks. soldater fjernes. Eksemplet er lavet ud fra at der anvendes Portland Cement (OPC), betontemperaturen er min. 15 °C, og at der udføres god efterbehandlingspraksis.

For betonelementer ønskes der ofte at reducere afformningstiden. Derfor designes flere betonrecepter til elementproduktionen til at kunne afformes efter ca. 12 timer. Afformningstidspunktet kan endda reduceres yderligere ved anvendelse af forskellige accelererende additiver eller ved tilførsel af varme.

Relevante betonteknologiske begreber

For at forstå betonens styrker og svagheder, er det vigtigt at kigge på betonens egenskaber over tid. Betonegenskaber ændrer sig over tid da materialet gennemgår en kemisk proces, hvor cementen reagerer med vand. I denne bog er der udvalgt nogle parametre, der anses for at være vigtige for betonvareproducenterne.

Åbningstid

Åbningstiden for beton beskriver hvor lang tid der går fra at betonen er blandet til at den ikke længere er bearbejdelig. Selvom jordfugtig beton fremstår tør, så vil den ved komprimering og vibration antage en bearbejdelig tilstand. Denne bearbejdelige tilstand er mulig at udnytte så længe at betonen ikke har overskredet åbningstiden. Ved produktionsstop i en betonvareproduktion risikeres der at den beton, som endnu ikke er støbt, overskrider åbningstiden. Her kan producenten opleve, at betonens bearbejdelighed reduceres så meget at betonen ikke kan komprimeres tilstrækkeligt. Lange produktionsstop forekommer dog sjældent og producenterne af jordfugtig beton blander ofte små satsstørrelser. Konsekvensen af et kasseret læs er derfor af mindre betydning. I de aktuelle produktstandarder er der derfor ingen prøvningsmetoder til at teste åbningstiden af jordfugtig beton. Åbningstiden er dog en begrænsning af produktionsvinduet og derfor ikke en ubetydelig egenskab.

Ved produktion af fabriksbeton, kan åbningstiden overskrides pga. transporttiden. Fabriksbeton som er afbundet, kan ikke vibreres ud i formen og kan i værste tilfælde resultere i at betonen ikke kan tømmes ud af roterbilen eller en afbrudt støbning. Derfor er der for fabriksbeton krav til at måle konsistensudviklingen over tid.

Varmeudvikling

En anden vigtig egenskab i betonen er varmeudviklingen. Den kemiske reaktion mellem vand og cement producerer store mængder af energi i form af varme, som fordeles i betontværsnittet. Mængden af energi afhænger af betonens og cementens sammensætning. For at give en idé om hvor meget energi, der er tale om, ses herunder et eksempel på varmeudviklingen i en beton.

Parameterbeskrivelse	Beregning/Værdi
Cementens varmeudvikling	355 kJ/kg (BASIS Cement)
Cementindhold i en m ³ jordfugtig beton:	280 kg/m ³ (Eksempel på kantstensbeton)
Total varmeudvikling:	$Q = 355 \times 280 = 99.400$ kJ

Det svarer til den mængde energi, der frigives ved forbrænding af ca. 3 liter benzin, og en temperaturstigning i betonen på ca. 40°C, hvis varmeenergien ikke blev afgivet til omgivelserne.

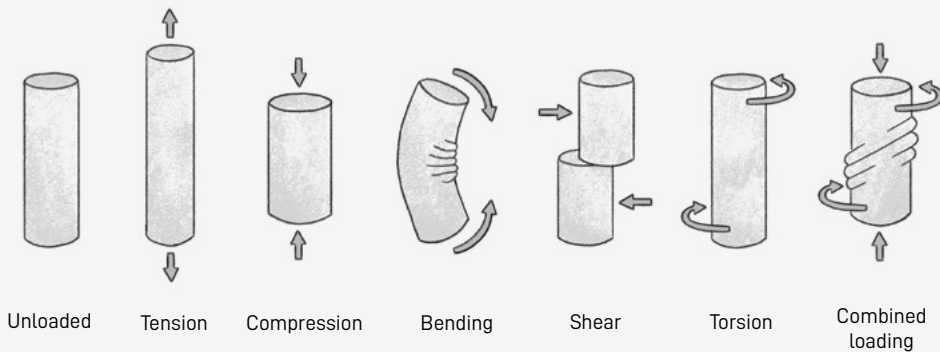
Ved produktion af betonvarer med relativt små tværsnit, afgives energien hurtigt til omgivelserne. Betonvareproducenter oplever derfor sjældent problemer med revnedannelse forårsaget af temperaturforskelle i betonen. Det ses dog indimellem ved produktion af store betonrør, hvor samlingspunkter kan være ret massive. Varmeudviklingen sker primært i det første døgn efter blanding. Disse to faktorer gør at betonvareproducenterne med fordel kan udnytte energitabet det første døgn, til at hæve lagringstemperaturen hvis betonvarer lagres i et isoleret hærdekammer.

For konstruktionsbetoner med relativt store tværsnit til, f.eks. vindmøllefundamenter, vil betonkonstruktionen ofte stige i temperatur efter støbningen. Varmeudviklingen i relativt store betontværsnit kan øge risikoen for revnedannelse forårsaget af temperaturforskellen i betontværsnittet. Derfor er det indimellem nødvendigt at simulere betonens hærdeforløb. Ved at ændre betonens sammensætning, anvende isolerende tildækning eller køling kan risikoen for revnedannelse reduceres.

Betonens styrker og svagheder

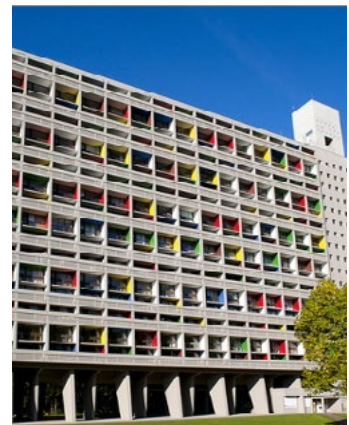
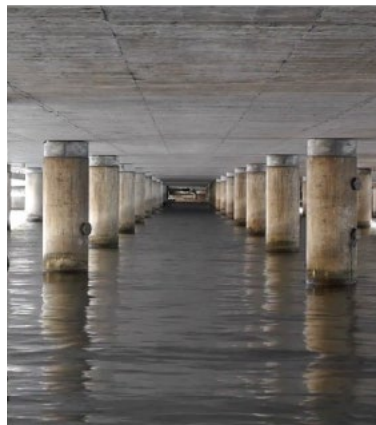
For at forstå betonens styrker og svagheder er det en fordel at forstå de typer af lastpåvirkninger, som materialet kan udsættes for. Et eksempel på lastpåvirkninger kan ses på figur 26.

Når beton anvendes til bærende konstruktioner, er det for at udnytte den høje trykstyrke, som materialet besidder. Herunder ses et par eksempler på tydelige betonkonstruktioner og den taktiske placering af betonen.



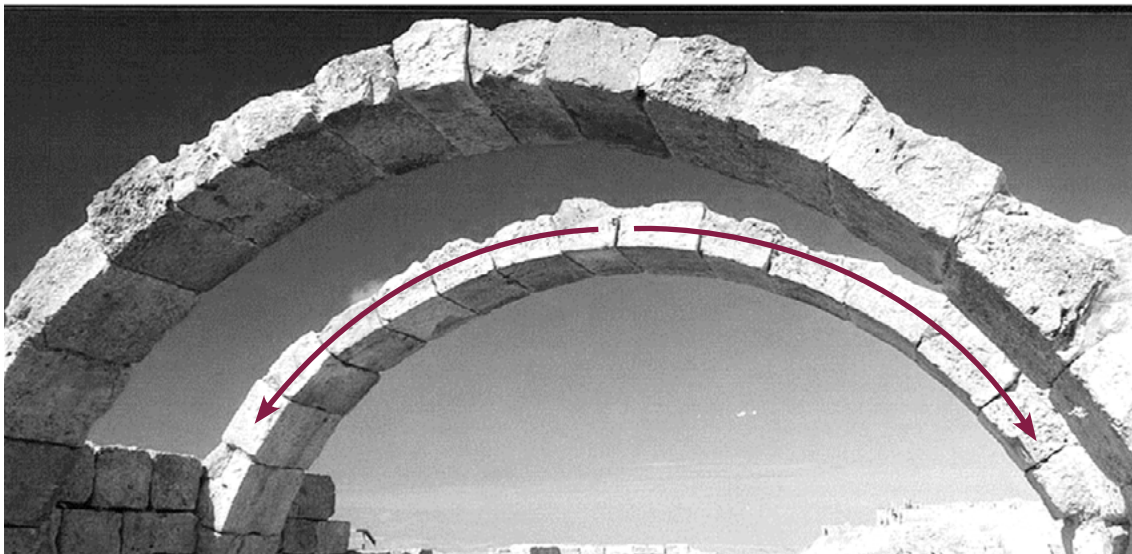
Figur 26 – Eksempler på lastpåvirkninger, fra venstre ubelastet; træk; tryk; bøjning; forskydning; vridning; kombineret lastpåvirkning

På figur 27 ses tre eksempler på konstruktioner, hvor betonen tydeligt indgår i de vertikale linjer. Betonen er altså valgt som en af de konstruktionsdele, der fører den lodrette last ned til oversiden af det bærende lag i jorden. Fordelen ved beton er, at det kan optage store trykpåvirkninger uden at gå i stykker. Trykstyrke i beton betragtes derfor som en af de vigtigste egenskaber.



Figur 27 – Eksempel på bærende konstruktioner af beton

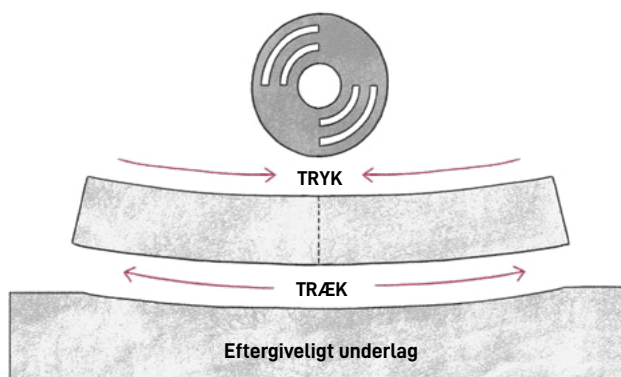
Hvis det er muligt at undgå trækpåvirkninger i en konstruktion vha. af den geometriske udformning, kan beton endda fungere som en uarmeret konstruktion. Denne udformning kaldes en trykbue. På figur 28 ses et eksempel på hvordan romerne anvendte geometrien til at udnytte materialet fuldt ud. Dette ses typisk på ældre konstruktioner ved døråbninger og hvælvinger i murværk eller betonkonstruktioner.



Figur 28 – Eksempel på trykbue i ældre murværk

Betons trækstyrke er kun ca. 10% af trykstyrken [20]. Udsættes varmeret beton for træk vil bruddet indtræffe ved meget lavere belastning end for trykpåvirkning. Nedenfor ses et tænkt eksempel på en betonflise, der belastes af et hjul fra et køretøj, og som er understøttet af et dårligt komprimeret underlag. Når betonen begynder at bøje, som på figuren, vil der i toppen opstå trykspændinger og i bunden trækspændinger.

Figur 29 –
Eksempel på
hjulbelastning af
flise lagt på dårligt
komprimeret
bærende underlag



Belastes en varmeret betonflise som på figuren ovenfor, vil der først opstå revnedannelse i undersiden og et trækbrud dannes. Trækstyrken er derfor en

vigtig mekanisk egenskab for mange betonvareprodukter af jordfugtig beton såsom belægningssten, fliser og kantsten.

Trækstyrken afhænger af vedhæftningen mellem betonens pasta og tilslagspartikler. Vedhæftningen styres af forholdet mellem vand og cement, hvor et lavere vand/cement-forhold vil skabe en bedre vedhæftning og omvendt.

Den mindste revne vil betyde at vedhæftningen mellem tilslagspartikler og pasta ophører det sted hvor revnen opstår. Trækstyrken i forskellige prøvemønstre med den samme beton vil derfor variere meget, da den afhænger af gitterstrukturen mellem pasta og tilslagspartiklerne. Derfor anses trækstyrken for at være en upålidelig mekanisk egenskab til bærende konstruktioner. Brud forårsaget af trækpåvirkning i uarmeret beton karakteriseres derfor som et uvarslet skørt brud.

Der kan i jordfugtig beton, som ikke er en del af den bærende konstruktion, regnes med en træk bæreevne i betonen. Her er konsekvenserne ved et svigt meget små. Ofte betyder et brud kun udskiftning af en enkelt flise eller sten. For beton til bærende konstruktioner er konsekvenserne af brud meget større. Derfor må trækstyrken heller ikke anvendes til beregning af bærende konstruktioner. Betonen kan dog kombineres med stål og andre materialer, så det bliver muligt at optage store trækpåvirkninger.

Armeret beton

For at kunne optage træk i betonen kan der anvendes armering. Armeringen kan være lavet af forskellige materialer, men det mest anvendte er stål. Armeringsstålet placeres i de dele af konstruktionen, som er påvirket af træk. Det er derfor ikke ligegyldigt hvor armeringen placeres. På figuren ovenfor hvor betonflisen belastes af et hjul, vil trækket opstå i bunden af flisen. Tværsnittet og armeringen vil derfor være bedst udnyttet ved placering af armeringen i bunden.

En kendt problematik ved anvendelse af armeret beton er nedbrydning af stålet. Jern som ligger i tæt pasta, er beskyttet på grund af pastaens høje indhold af calciumhydroxid Ca(OH)_2 , som gør porevæsken basisk ($12 < \text{pH} < 14$) [21]. Den høje pH-værdi er med til at passivere jernet. Denne passivering kan nedbrydes, hvis koncentrationen af OH^- -ioner fra calciumhydroxid reduceres pga. karbonatisering, eller hvis Cl^- -ioner trænger ind. Hastigheden

af begge nedbrydningsmekanismer øges i områder med støbefejl, stenreder, revner og i porøs beton. For at modvirke disse nedbrydningsmekanismer er det vigtigt at sørge for en god håndværksmæssig udførelse og efterbehandling, samt vælge en beton med en god tæthed. Tætheden styres primært af vand/cement-forholdet, hvor et lavt vand/cement-forhold giver en tæt beton.

En svingende temperatur får forskellige materialer til at udvide og trække sig sammen afhængigt af materialets varmeudvidelseskoefficient. For stål og beton er varmeudvidelseskoefficient tilnærmelsesvis ens. Det betyder, at der ikke opstår spændinger imellem armering og beton som følge af bevægelse mellem materialerne. Stål og beton passer godt sammen, og det gør armeret beton til et bredt anvendeligt materiale.

Betonstyrke

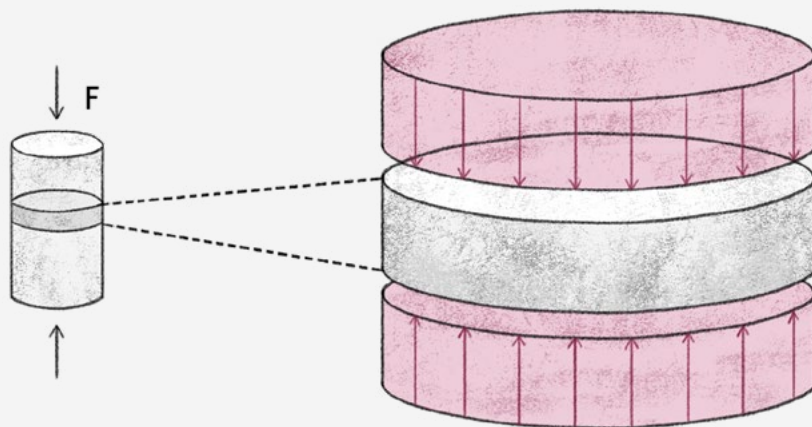
Styrken af en beton beskriver, hvor stor mekanisk belastning beton kan optage uden at det forårsager et brud. Styrken angives i enheden pascal (Pa), som er Newton pr. kvadratmeter (N/m^2). Styrken af beton er af en sådan størrelse, at den angives i millioner af Pascal, også kaldet Megapascal (MPa).

Ovenfor ses en cylinder, som er belastet med en kraft F med enheden newton, N . Cylinderens tværsnitsareal sættes til at have størrelsen A med enheden kvadratmeter, m^2 . Kraften F antages at fordelene sig ligeligt over hele cylinderens areal. En kraft fordelt over et areal kaldes også for en fladelast og har enheden newton pr. kvadratmeter, N/m^2 . Fladelasten noteres med bogstavet σ , som kan findes ved følgende udtryk.

$$\sigma = F/A$$

Hvor:

- F , er kraften angivet i Newton [N]
- A , er arealet angivet i kvadratmeter [m^2]
- σ , er fladelasten angivet i Newton pr. kvadratmeter [N/m^2] eller Pascal [Pa]



Figur 30 – Eksempel på søjle belastet med kraft, F

I tabellen herunder ses et eksempel på, hvor meget en betoncylinder kan holde til.

Parameterbeskrivelse	Beregning/Værdi
Betonstyrke	$f_c = 30 \text{ MPa} = 30.000.000 \text{ N/m}^2$
Areal $\varnothing 150\text{mm}$	$A = 0,0177\text{m}^2$
Kraft	$F = f_c \times A$ $F = 530144\text{N} = 530,1 \text{ kN}$

Det kan være svært at forholde sig til, hvor meget denne kraft svarer til. Derfor kan der laves en lille omregning, så det ses hvor meget vægt der skal lægges ovenpå cylinderen for at skabe en belastning tilsvarende betonstyrken.

Tyngdeaccelerationen, a	$a = 9,82 \text{ m/s}^2$
Masse (vægt)	$m = F / a$ $m = 53986 \text{ kg} \approx 53,9 \text{ tons}$

Cylinderen i eksemplet kan altså belastes med 53,9 tons før den går i stykker. Der er altså tale om et materiale, som kan påvirkes store trykkræfter uden at gå i stykker.

Når betonens trykstyrke skal måles, påføres prøveemnet et aksialt tryk, som øges indtil bruddet indtræffer. Når prøveemnet bryder aflæses lasten. Prøveemnets areal er kendt, og derved kan brudspænding og altså styrke af cylinderen beregnes.

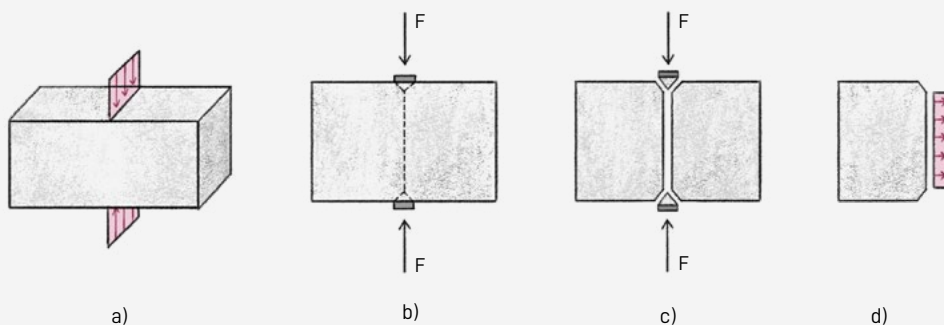
■ Betonvarer styrkeegenskaber

Ligesom mange andre materialer har beton flere former for mekaniske egenskaber såsom forskydnings-, træk og trykstyrke. For betonvarer af jordfugtig beton deklareres der forskellige mekaniske egenskaber alt efter hvilken type produkt der er tale om. Se eksempler herunder.

Bestemmelse af styrke for belægningssten

Spaltetrækstyrke iht. DS/EN 1338

Belægningssten skal overholde et deklareret krav til spaltetrækstyrke. Derfor testes belægningssten ved følgende forsøgsopstilling.



Figur 31 – Illustration af forsøgsopstilling for spaltetrækstyrke i belægningssten

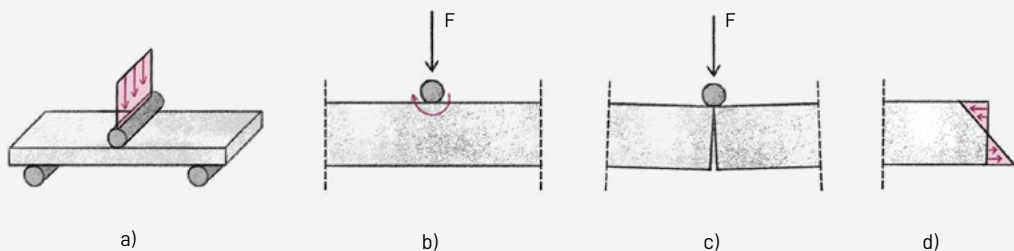
Belægningsstenen belastes som vist på a). For at fordele lasten jævnt, placeres en mellemlægsstykke imellem lasten og prøveemnet. Lasten F øges indtil prøveemnet spaltes som vist på c). Når prøveemnet spaltes i to, er det fordi belastningen overstiger betonens trækstyrke. Der vil opstå en mindre

randeffekt der hvor trykfladen er i kontakt med prøveemnet. Dette er dog af så lille betydning, at hele prøveemnets tværsnit benyttes ved beregning af spaltetrækstyrken. Spaltetrækstyrken er altså en tilnærmelse af betonens trækstyrke. Spaltetrækstyrken deklarerer for belægningssten, fordi det er en god metode til at illustrere effekten af tunge lodrette belastninger f.eks. fra køretøjer med hårde hjul såsom gaffeltrucks eller opbevaring og lagring af gods på paller.

Bestemmelse af styrke for fliser

Bøjningsstyrke iht. DS/EN 1339

Fliser skal overholde et deklareret krav til bøjningsstyrke. Derfor testes fliser ved følgende forsøgsopstilling.



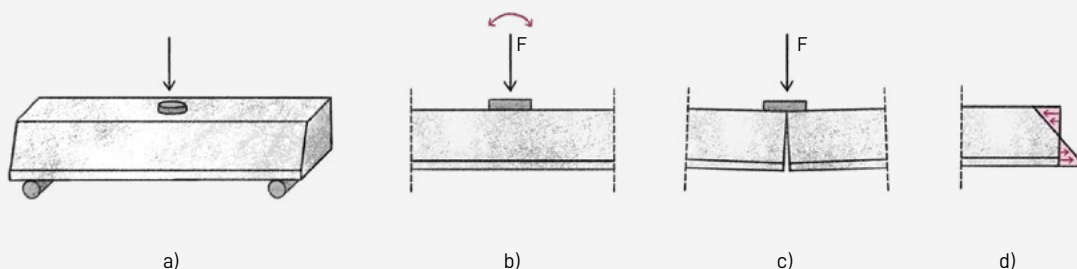
Figur 32 – Illustration af forsøgsopstilling for bøjningsstyrke i fliser.

Fliser belastes som vist på a). Når prøveemnet får en nedbøjning, må understøtningerne ikke fastholde prøveemnet. De lastbærende understøtninger vist på a), skal derfor være i stand til at rotere. Når lasten F øges vil prøveemnet begynde at bøje som vist på c). Herved opstår der træk- og trykspændinger i tværsnittet, som vist på d), hvor oversiden trykkes sammen, mens undersiden trækkes fra hinanden. I uarmeret jordfugtig beton er evnen til at optage trækspændinger væsentlig lavere end evnen til at optage tryk. Prøveemnet belastes indtil det knækker, og bøjningsstyrken beregnes. Et kritisk scenarie for fliser kan være at det bærende underlag f.eks. en komprimeret sandbund, ikke er har opnået den tilstrækkelige komprimeringsgrad. Hvis det bærende underlag ikke er stabilt, kan der ved lastpåvirkning opstå bøjning i flisen. Det er derfor vigtigt at teste flisens bøjningsstyrke.

Bestemmelse af styrke for kantsten

Bøjningsstyrke iht. DS/EN 1340

Kantsten skal overholde et deklareret krav til bøjningsstyrke. Derfor testes kantsten ved følgende forsøgsopstilling.



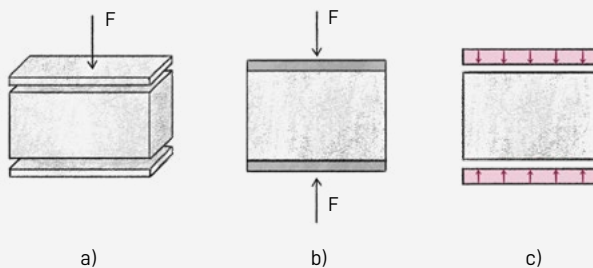
Figur 33 – Illustration af forsøgsopstilling for bøjningsstyrke i kantsten.

Kantsten belastes som vist på a). Når prøveemnet får en nedbøjning, må maskinen ikke fastholde prøveemnet. Den lastoverførende samling, skal derfor være i stand til at rotere, som det ses på b). Bæringerne under prøveemnet må ligesom for fliser ikke fastholde prøveemnet og skal derfor kunne rotere. Når lasten F øges vil prøveemnet begynde at bøje som vist på c). Herved opstår der bøjningsspændinger i tværsnittet, som vist på d), hvor oversiden trykkes sammen, mens undersiden trækkes fra hinanden. Prøveemnet belastes indtil det knækker, og bøjningsstyrken beregnes. Et kritisk scenarie for kantsten kan være at en punktlast fra et køretøj belaster kantstenen. Hvis ikke kantstenen kan modstå belastningen i begge retninger, vil kantstenen knække. Derfor skal kantstenen testes for bøjningsstyrke omkring den svage akse. Bøjningsstyrken omkring den svage akse skal derfor deklareres af producenten.

Bestemmelse af styrke for kantsten

Bøjningsstyrke iht. DS/EN 1340

Letklinkerblokke skal overholde et deklareret krav til trykstyrken. Derfor testes letklinkerblokke ved følgende forsøgsopstilling.



Figur 34 – Illustration af forsøgsopstilling for trykstyrke i letklinkerblokke.

Letklinker blokke belastes som vist på a) ved at placere prøveemnet i en tryk-
presse. Producenterne må gerne skære et prøveemne ud, hvis det færdige
produkt er for stort til at gå i trykpressen. Det udskårne prøveemne skal dog
have højde/diameter forhold, som for det færdige produkt. Den lastoverfø-
rende plade, skal være i stand til at kunne bevæge sig vandret, så den ikke
fastholder prøveemnet. Prøveemnet belastes med en bestemt hastighed
iht. standarden indtil bruddet indtræffer. Letklinkerblokke anvendes ofte til
vægge, hvis rolle typisk er at føre den lodrette last ned til fundamentet. Er
konstruktionen påvirket af vandrette laster, kan letklinkerblokke opbygges
med armeringsjern. Det er derfor afgørende at letklinkerblokke har den nød-
vendige trykstyrke.

Ved produktion af jordfugtig beton til betonvarer er der ikke en fast deklara-
tionstermin på produktet. Producenten vælger i stedet en lagringsperiode,
som svarer til, at betonvaren har udviklet den deklarerede styrke. Dette be-
tegnes som "tidligste anvendelsestidspunkt", og produktet må derfor først
frigives efter at have opnået denne lagringstid. Denne lagringstid fastsættes
efter styrkeudviklingens hastighed for den enkelte recept, løbende statistik
på prøver og ikke mindst lagerkapacitet. Lagringstiden udtrykkes som "mo-
denhed", som er afhængig af tid og temperatur. I betonvareproduktionen er
denne størrelse også benævnt "hærdedøgn" og forkortes HD. For betonvare-
producenter er det praksis at den deklarerede styrke opnås indenfor 3 - 14
HD afhængigt af produktet. Dette medfører en højere slutstyrke og dermed
sikkerhed, end hvis de var deklareret efter 28 døgn.

For konstruktionsbetoner refererer betonstyrken til betonens 28 døgns tryk-
styrke. Betonens styrke indgår ofte i produktnavnet. Produktbetegnelse

"C12/15" betyder f.eks. at den karakteristiske trykstyrke målt på en cylinder er 12 MPa og målt på en terning 15 MPa. Her er der altså tale om et betonenmes en-aksede trykstyrke målt på enten en cylinder eller en terning. Betonemnet måles efter 28 hærdedøgn. Et eksempel på trykstyrkeprøvning af en betoncylinder ses herunder.

Figur 35 –
Eksempel på
forsøgsopstilling
for trykprøvning af
betoncylinder.

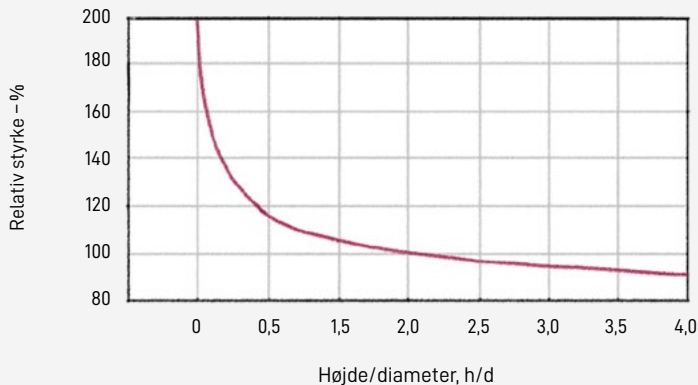


■ Prøveemnets geometri

Den geometriske udformning af prøveemnet har betydning for måling af trykstyrke resultatet. Jo slankere prøveemner er, jo lavere styrker vil der blive målt uafhængigt af valg af beton. Forholdet mellem højde: (diameter el. bredde) har derfor en afgørende betydning for den målte trykstyrke.

Lave prøveemner som terninger resulterer derfor som udgangspunkt i en højere styrke sammenlignet med høje prøveemner som cylindre. Det skyldes både at betoncylindre typisk har et højde: diameter forhold på 2:1, mens betonterninger støbes i højde: bredde forhold på 1:1. Et eksempel på den målte styrke som funktion af prøveemnets geometri ses i figur 36.

Derudover er prøveemnets trykflader i kontakt med de last overførende plader. Friktionen mellem prøveemnet og de lastoverførende plader gør, at prøveemnet ikke kan udvide sig frit. Dette forurener den en-aksede spændingstilstand tæt ved de lastoverførende plader og giver en højere målt værdi af brudspændingen. Da trykarealet på en $\varnothing 100$ mm cylinder er ca. 20% mindre end trykarealet på en 100x100mm terning, vil forureningen være størst på terningformede prøveemner, og derfor måles en højere styrke på terninger. For konstruktionsbeton iht. den europæiske betonstandard [19] anvendes omregningsfaktoren vist i tabellen.



Figur 36 – Betons trykstyrke som funktion af forholdet mellem prøvelegemets højde h og diameter d . Styrken ved $h/d = 2,0$ er sat til 100%. Figuren gælder for styrkeniveauet ca. 15 MN/m^2 . [21]

Dette er dog forbundet med en stor usikkerhed, da forskellen på det relative styrkeforhold ved forskellige højde: diameterforhold afhænger af styrkeniveauet. Effekten er f.eks. størst på betoner med lav styrke.

Geometrisk styrkeomregningsfaktor iht. [19]

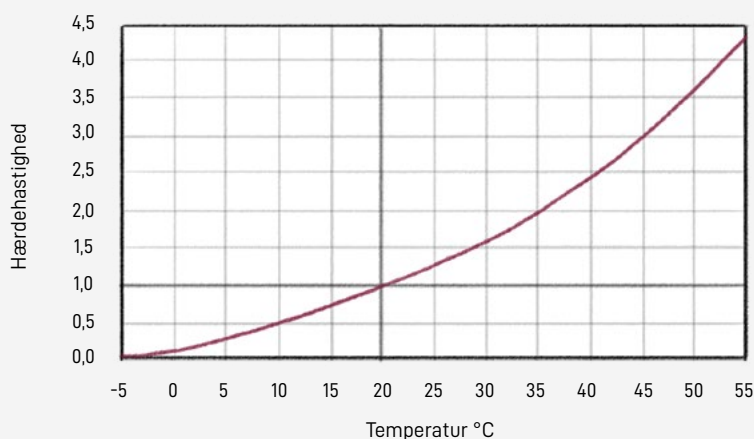
Målt som	Omregnes til	Faktor
Terning ($h:b = 1:1$)	Cylinder ($h:d = 2:1$)	$f_{\text{cyl}} = 0.8 \cdot f_{\text{cube}}$
Cylinder ($h:d = 2:1$)	Terning ($h:b = 1:1$)	$f_{\text{cube}} = 1.25 \cdot f_{\text{cyl}}$

Styrkeudvikling

Styrkeudviklingen begynder når afbindingen af betonen har fundet sted. Dannelsen af reaktionsprodukter i den hærdende fase resulterer i en stærkere og tættere gitterstruktur i pastaen. Herved udvikles vedhæftningen mellem pasta og tilslagspartikler, som tilsammen er grundlag for styrken i betonen.

Betonens styrkeudvikling er som tidligere nævnt afhængig af den kemiske reaktion mellem vand og cement. Hastigheden hvorved reaktionsproduk-

terne dannes, er ligesom mange andre kemiske reaktioner afhængige af materialets temperatur. Som standard er der valgt en referencetemperatur på 20 °C, hvorved den relative hærdehastighed, $H(T)$ regnes ud fra. Jo varmere betonen er, jo hurtigere foregår reaktionen og omvendt. Dette er illustreret i den nedenstående graf.



Figur 37 – Sammenhængen mellem hærdehastighed og temperatur beskrevet af Arrhenius ifølge [20]

På grafen ses at referencetemperaturen er 20 °C og svarer til hærdehastigheden 1,0. Hærdehastigheden anvendes til at beregne modenheden af betonen. Modenheden er et udtryk for betonens alder ved 20 °C. Hærdehastigheden hjælper brugeren med at vurdere betonens aktuelle alder, hvis betonen har været lagret ved anden eller varierende temperatur. Ved at registrere temperaturen af betonen over tid er det muligt at estimere betonens modenhed. For betonvare udtrykkes modenheden i antal hærdedøgn med betegnelsen HD. Et hærdedøgn, 1HD, svarer til et døgn ved 20 °C.

Et eksempel ses herunder.

Beregningseksempel for modenhed (hærdealder)

En betonproducent måler normalt sine prøver efter 5 HD, altså 5 døgn ved 20 °C i vandkar. Et nyt sæt prøver blevet lagt i vandkarret, men efter 24 timer går temperaturstyringen i stykker. Vandet og prøverne er nu 25 °C og det er først muligt at reparere apparaturet 4 dage senere. Betonproducenten vil nu gerne vide hvornår han skal måle egenskaberne, for at det svarer til 5 HD.

Tidsinterval, Δt	Temperatur, T	Hærdehastighed, H(T)
Timer	°C	–
0 – 24	20	1,0
24 – 120	25	1,3

Det ønskes nu at finde ud af hvor mange klokketimer det tager før betonen har opnået 5 HD altså 120 hærdetimer. Hærdealderen findes ved at gange den relative hærdehastigheden med antallet af timer.

$$\text{Hærdealder} = \Delta t \times H(T)$$

Tidsinterval, Δt	Hærdehastighed, H(T)	Modenhed (hærdealder)
Timer	–	Hærdetimer
0 – 24	1,0	24

I løbet af de første 24 timer, har prøverne opnået en hærdealder på 24 hærdetimer. Betonproducenten skal nu finde ud af hvor mange hærdetimer prøverne skal lagres i vandkarret ved 25 °C for at opnå en hærdealder på 120 hærdetimer.

$$\text{Resterende lagringstid} = 120 - 24 = 96 \text{ hærdetimer}$$

Temperaturen i vandet er 25 °C, og hærdehastigheden er derfor $H(T) = 1,3$. Hvor mange timer skal prøverne lagres ved 25 °C for at have opnået den resterende lagringstid?

$$96 = 1,3 \times t$$

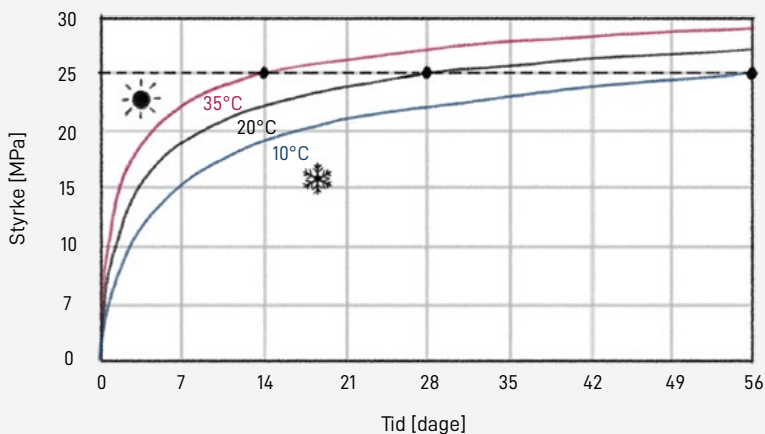
$$t = 74 \text{ timer}$$

Prøveemnerne skal altså lagres 24 timer ved 20 °C samt 74 timer ved 25 °C før de har opnået den ønskede hærdealder på 120 hærdetimer.

Det betyder at han skal måle prøverne efter 98 timer, svarende til ca. 4 døgn for at opnå de 5 HD.

Dette er en dag tidligere end den normale termin, og derfor vigtig for producentens planlægning.

Hastighedsfunktionen og modenhedsberegning kan altså fortælle noget om betonens modenhed, hvis betonens temperatur er registreret. Styrkeudviklingen i betonen følger udviklingen i modenhed/hærdealder, som udvikles i takt med cementens kemiske reaktion. Et eksempel på styrkeudviklingen ved forskellige lagringstemperaturer ses herunder.



Figur 38 – Eksempel på styrkeudvikling ved forskellige temperaturer

På figuren ovenfor se styrkeudviklingen ved forskellige temperaturer, for en konstruktionsbeton med en forventet 28 døgns trykstyrke på 25 MPa. Det ses at betonen ved forskellige temperaturer opnår sin forventede 28 døgns styrke til forskellige tider. Som tommelfingerregel kan det altså noteres at styrkeudviklingen går dobbelt så hurtigt ved 35 °C, mens det ved 10 °C tager dobbelt så lang tid.

De kemiske reaktioner i betonen kan forekomme så længe at der er frit vand og ureageret cement til stede i materialet. Betoner med $v/c > 0,45$ vil indeholde nok vand til at alle cementkornene kan reagere. Er forholdet derimod $v/c < 0,40$ er der tale om en såkaldt selvudtørrende beton. Det betyder at cementens kemiske reaktioner opbruger alt det tilgængelige vand, som er til stede i betonen. Når alt vandet er bundet enten kemisk eller fysisk til cementen vil de resterende cementkorn forblive ureagerede.

Vand – / Cementforhold

Styrkeoptimering af beton er et tilbagevendende emne i betonbranchen, og derfor også et vigtigt emne i denne bog. Det er derfor vigtigt at se på hvilke faktorer, der har betydningen for styrkeoptimeringen. Betonen er sammensæt af en pasta og tilslagspartikler, og trykstyrken i betonen vil derfor afhænge af disse materialer. Pastaindholdet vil typisk være svagere end tilslagsmaterialerne og betonens trykstyrke vil derfor primært afhænge af pastaens sammensætning. For letklinkerbeton er dette ikke altid en regel, da letklinker tilslaget kan være svagere end pastaindholdet. Ved at undersøge pastaen ses det tydeligt at pastastyrken ændres som funktion af forholdet mellem vand og cement. Litteraturen foreslår derfor flere beregningsmodeller, som kan estimere betonstyrken på baggrund af vand- /cementforholdet. Et eksempel på en sådan beregningsmodel er Bolomeys formel beskrevet i [21], se forklaring nedenfor.

Parameterbeskrivelse	Beregning/Værdi
Betonstyrken	$f_c = K \cdot \left(\frac{1}{v/c} - \alpha \right)$, Bolomeys formel
Styrkefaktor	K, afhænger af termin, cement og tilslag
Vand- / Cementforhold	v/c , masseforholdet mellem vand og cement
Konstant	α , afhænger af termin og cement

Værdierne for K og α er primært afhængige af cementens egenskaber, men vil også kunne afhænge af tilslagsmaterialerne især for højstyrkebeton.

Hver cement har sine egne styrkeudviklings parametre, og for at kunne anvendes skal værdierne baseres på forsøg med de tilslagsmaterialer, som typisk er tilgængelige.

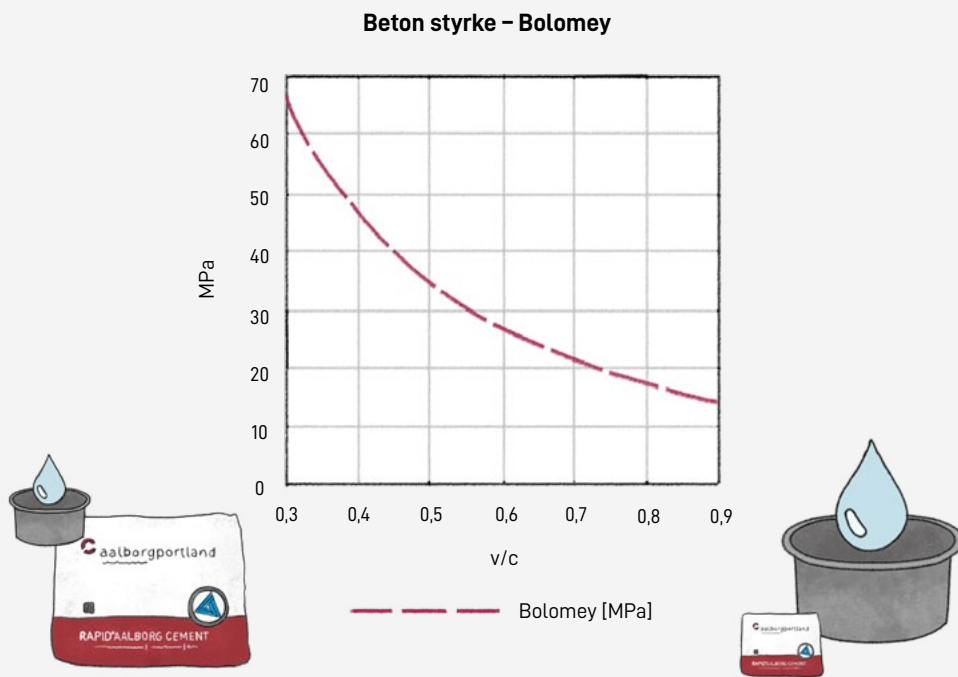
Herunder ses styrkeparametrene fra de mest anvendte cementer fra den danske cement producent Aalborg Portland med udgangspunkt i danske tilgængelige tilslagsmaterialer.

Cementtyper	Termnin døgn	K MPa	α –
BASIS AALBORG Cement	1	13	1,0
	7	24	0,7
	28	29	0,6
BASIS Cement	1	17	0,9
	7	26	0,6
	28	30	0,5
RAPID Cement	1	13	0,9
	7	24	0,6
	28	30	0,5
LAVALKALI SULFATBESTANDIG Cement	1	5	0,8
	7	19	0,8
	28	29	0,7
AALBORG WHITE Cement	1	14	1,0
	7	28	0,8
	28	35	0,7

Figur 39 – Vejledende konstanter til Bolomeys formel [3].

Dette kan opstilles grafisk, ved at vise det beregnede styrkeniveau af en beton med varierende v/c- forhold, se figur 40.

Figur 40 viser, at der opnås højere styrke hvis man øger cementindholdet ved et fastholdt vandindhold. Bolomeys formel er ifølge [21] mest anvendelig med vand-/cementforhold i intervallet $0.45 \leq v/c \leq 1.25$. Anvendes Bolomeys formel til betoner uden for intervallet, vil beregningen være behæftet med en større usikkerhed. Hvis betoner indeholder luft, kan der anvendes en korrigeret Bolomeys formel. Dette er både relevant ved jordfugtige betoner og blødstøbt beton med luftindblanding. For blødstøbte betoner anvendes der ofte luftindblandingsmiddel, som ændrer overfladespændingen i pastaen.

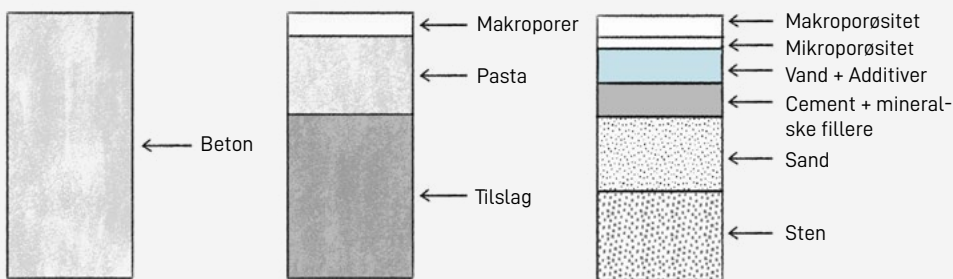


Figur 40 – Effekt af varierende v/c-forhold på 28-Døgns styrken med RAPID cement, luftindhold = 6%.

Derved er det muligt at danne en luftporestruktur jævnt fordelt i pastaen for at opnå en god frostbestandighed. Luft/porøsitet reducerer styrken i beton, og det er derfor en forudsætning at luft/porøsiteten kendes for at anvende den korrigerede Bolomeys formel. Som tommelfingerreglen reduceres betonstyrken ca. 4 - 5 % for hvert % luftindholdet/porøsiteten øges med. Jordfugtige betoner vil ofte have en makroporøsitet, som opstår ved at luft fanges i betonen under komprimering. Dette luftindhold vil typisk øges hvis betonen ikke komprimeres tilstrækkeligt. Makroporøsiteten har en styrkereducerende effekt på den jordfugtige beton.

Betonrecepten og delmaterialer

I dette afsnit introduceres et eksempel på sammensætningen af en jordfugtig betonrecept. Beton er opbygget af forskellige delmaterialer i et blandingsforhold, som giver de ønskede egenskaber. Den nedenstående figur illustrerer hvad en typisk jordfugtig beton består af ud fra en volumen betragtning.

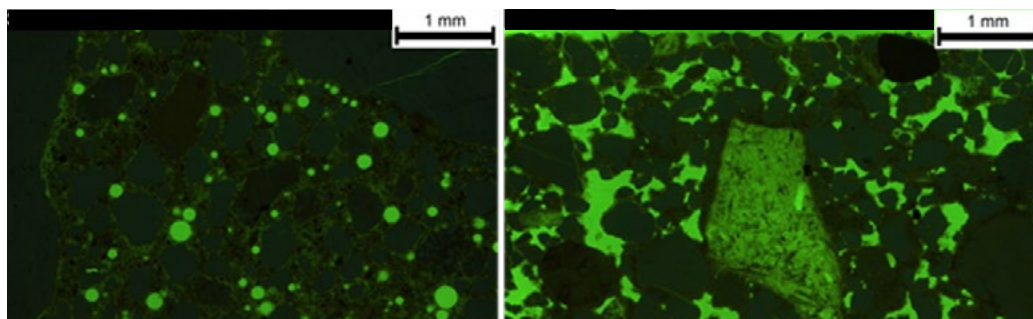


Figur 41 – Eksempel på sammensætning af jordfugtig beton.

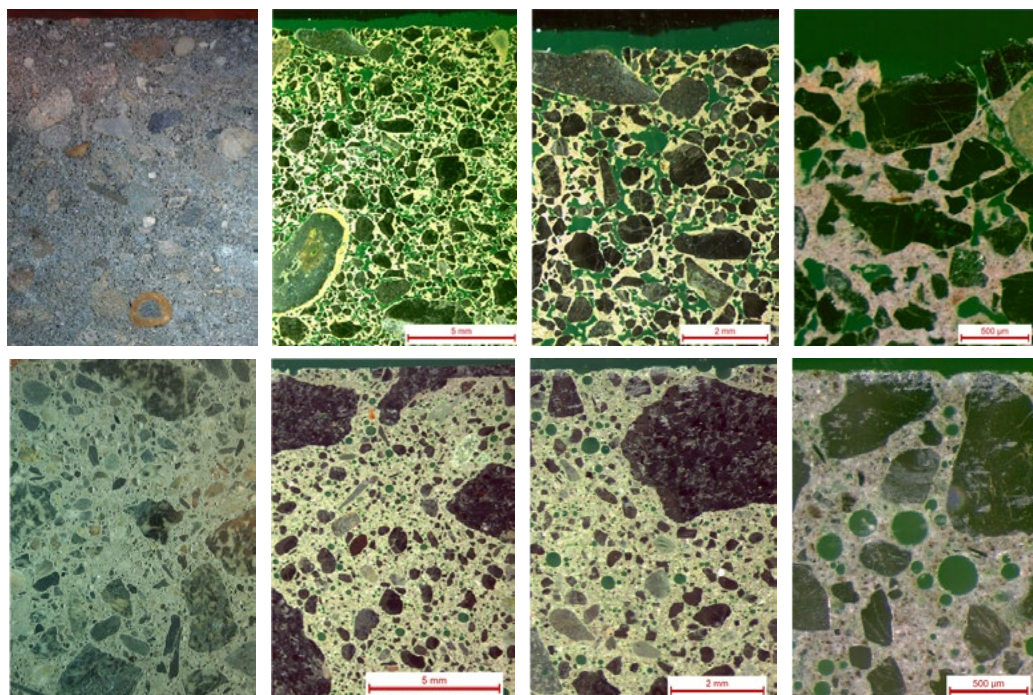
På figuren ovenfor til venstre, ses betonen først som en samlet enhed. Betonen kan herefter inddeles i tre hovedelementer nemlig makroporer, pasta og tilslag.

Makroporerne opstår ved at luft indkapsles under komprimering af den jordfugtige beton. Makroporerens form og fordeling styres af betonens sammensætning og produktionsmetoden. Porestrukturen er derfor meget tilfældig mht. både form og placering. Det er vigtigt at skelne mellem indkapslet luft i jordfugtig beton og indblandet luft i blødstøbt beton. I blødstøbt beton anvendes der ofte et luftindblandingsmiddel, som hjælper med at stabilisere luftporer i pastaen. Mængden, fordelingen og formen på denne luftporestruktur er mere veldefineret og vil typisk være homogent fordelt i pastaen, som kuglerunde luftporer. Forskellen mellem makroporer i jordfugtig beton og kemisk luft i blødstøbt beton er vist på figur 42.

På figur 42 ses et eksempel på et mikroskop billede af et betontyndslib fyldt med epoxybehandling ligesom på figur 43



Figur 42 – Luftporestruktur i blødstøbt luftindblandet beton (tv.) og makroporøsitet i jordfugtig flisebeton (th.).



Figur 43 – Eksempel på luft/porøsitet i jordfugtig- og blødstøbt beton.

På figur 43 ovenfor ses der øverst en flise af jordfugtig beton og nederst en cylinder af blødstøbt beton. Begge emner er blevet skåret ud, og der er lavet et tyndslib af betonerne efterfulgt af en epoxy-behandling. De grønne områder på figuren er epoxybehandlingen, som udfylder de porer betonerne måtte have. Jo flere grønne områder, jo mere luft/porøsitet indeholder betonen. Det ses altså tydeligt at luft/porøsitet i jordfugtig beton er væsentlig anderledes

end for blødstøbt beton. Det ses også på figuren ovenfor at makroporøsiteten i den jordfugtige beton er væsentlig større end i den blødstøbte beton. Dette har betydning for holdbarheden og styrken af betonen, og er derfor også illustreret på volumenfordelingen af fliserecepten.

Betonen kan også inddeles efter de enkelte delmaterialer, som vist til højre på Figur 41. Volumenfordelingen kan også angives som et antal liter ud af en kubikmeter beton. I skemaet nedenfor ses dette angivet i den sidste kolonne med overskriften "volumen". Betonreceptens delmaterialer bør altid normeres til en kubikmeter eller 1000 liter. Det betyder at summen af delmaterialernes volumen tilsammen skal give 1000 liter. Hvis ikke recepten er normeret, er det vanskeligt at sammenligne forskellige recepter.

De fleste blandesystemer afmåler delmaterialer efter masse målt i kilogram. I enkelte tilfælde afmåler blandesystemet efter volumen. Derfor indeholder en betonrecept altid informationer om delmaterilernes densitet, volumen og masse. Densiteten beskriver hvor meget det enkelte delmateriale vejer ift. hvor stort et volumen det udgør. Det er derfor en vigtig parameter for at kunne lave de nødvendige omregninger fra masse til volumen og omvendt. For at opnå en normeret recept, skal det samlede volumen af alle delmaterialer give 1000 Liter, da der går 1000 l/m³. I skemaet herunder ses betonrecepten på Figur 41.

Den totale masse er samtidig et udtryk for den teoretiske densitet af betonen.

Delmateriale	Absolut densitet	Masse	Volumen
	Kg/m ³	Kg/m ³	Liter
Cement	3100	280	90
Vand	1000	100	100
Sand	2650	795	300
Sten	2650	1.193	450
Luft	-	-	60
Total		2,368	1.000

Figur 44 - Eksempel på en jordfugtig betonrecept til betonvareproduktion.

Styringsparametre for jordfugtig beton

Betonrecepter til produktion af jordfugtige betonvareprodukter proportioneres ud fra følgende parametre.

- Styrke
- Formstabilitet
- Overfladeudseende
- Pris

Betonens delmaterialer og sammensætningen af dem påvirker disse egenskaber.

Styrken afhænger af stort set alle delmaterialer i betonen. Dog er der enkelte delmaterialer, der har større betydning for jordfugtig beton end andre. Komprimerbarheden er den vigtigste parameter for styrkeniveauet. Bedre komprimerbarhed giver lavere porøsitet og højere styrke. Komprimerbarheden kan justeres ved at optimere tilslaget sammensætning eller pastaandholdet. Begge muligheder uddybes nærmere i afsnittet omkring delmaterialer. Foruden komprimerbarheden kan v/c-forholdet reduceres for at øge styrken.

Formstabiliteten er vigtig for at de færdige produkter ikke kasseres. Hvis formstabiliteten i betonen er for ringe, kan producenten risikere for store variationer fra de ønskede dimensioner eller defekter ved transport af produktet fra afformning til lager. Formstabiliteten afhænger af pastaens volumen og sammensætning, samt tilslaget overfladekarakter og kornkurve. F.eks. kan en ru overflade i sandet øge formstabiliteten, mens en pasta med lavt pulverindhold og højt vandindhold vil reducere formstabiliteten.

Overfladeudseende er en særdeles subjektiv egenskab, da der ikke findes en eksakt måling af denne egenskab. Dog kan producenten ønske at producere glatte, blanke, ru eller matte overflader, som alle kræver forskellige sammensætninger. Ved at ændre på sandindhold, pastavolumen, cement- og fillermaterialer samt udstøbnings teknik kan producenten opnå forskellige overflader.

Ved design af en betonrecept, skal der foretages en lang række af valg, som tager højde for betonens senere anvendelse, holdbarhed, enhedspris mm. Disse overvejelser er grundlæggende for proportionering og er nødvendig for

at opnå en beton af god kvalitet. Der findes nogle proportioneringsprincipper, der kan bruges som et godt teoretisk udgangspunkt. Hvert enkelt delmateriale og blandeproces er behæftet med variation og usikkerhed. Derfor skal den teoretiske proportionering altid efterfølges af en optimering af recepten, som tilpasser betonen til det enkelte produktionssted. I dette afsnit undersøges de enkelte delmaterialer og der gives en forklaring på hvordan en ændring i det enkelte materiale har betydning for betonegenskaberne.

Tilslagsmaterialer

Tilslag var oprindeligt anset for at være et inert fyldmateriale, som kunne anvendes for at spare på mængden af pasta, da tilslagsmaterialerne var væsentligt billigere end cementen [23]. Gennem tiden har det dog vist sig at tilslagsmaterialernes mekaniske, fysiske, termiske og endda kemiske egenskaber spiller en afgørende rolle for betonens kvalitet.

Tilslagsmaterialer i Danmark navngives typisk efter partikelstørrelse og hvilken miljøpåvirkning de kan anvendes til iht. det danske tillæg til betonstandard DS/EN 206 DK NA [24]. Et eksempel på et tilslagsprodukt kunne være "0/1 Sand, kl. E". Betegnelsen "0/1", refererer til d/D, som angiver kornstørrelsesintervallet for det enkelte produkt iht. standarden for tilslag til betonproduktion [25]. Betegnelsen "kl. E", refererer til den miljøpåvirkning, som tilslaget kan anvendes til. Tilslagsmaterialer til betonproduktion inddeles typisk efter tre grupper afhængig af partikelstørrelsen.

Betegnelse	Partikelstørrelse
Filler	$\leq 0,25mm$
Sand, fint tilslag	$\leq 4mm$
Sten, groft tilslag	$> 4mm$

Tilslagsproducenterne i Danmark anvender forskellige udvindingsmetoder som svarer til den tilslagskilde, som de har til rådighed. Hovedparten af de danske tilslagsmaterialer stammer fra naturlige grusaflejringer [21]. Dette kan enten være sø eller bakkematerialer som hhv. udvindes under vand i de nærtliggende farvande eller i grusgrave. Der anvendes også sprængt klippemateriale som granit, som normalt importeres. De forskellige udvindingsmetoder og kilder gør at tilslagsprodukterne langt fra er ens. Produkterne

deklarerer derfor ofte med en angivelse af værdier, som beskriver geologisk oprindelse samt geometriske-, mekaniske-, fysiske- og kemiske egenskaber.

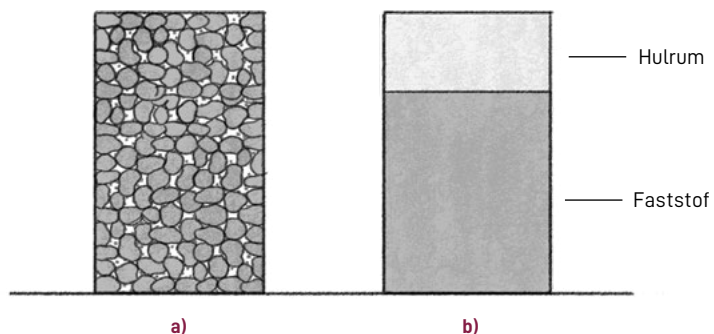
Til produktionen af byggesten f.eks. letklinkerblokke, er der ifølge den tilhørende standard og Betonvarekontrollens regelsæt, "BVK Manualen" [26], krav til tilslagsproduktets deklarerede egenskaber iht. standarden for tilslag til betonproduktion [25]. Ved produktion af fliser, belægnings- og kantsten er der ifølge de gældende standarder ikke krav til deklarerede egenskaber af tilslagsmaterialerne. Medlemmer af BVK skal dog overholde nogle krav til ændringer i tilslags sammensætningen for disse produkter. Væsentlige ændringer af bestemte egenskaber for anvendt tilslag, kræver derfor en ny typeprøvning af de relevante produkter [26].

Omkostningerne ved anvendelse af tilslagsmaterialer i stedet for pasta er dog stadig lave, hvilket også forklarer hvorfor der stadig er fokus på at øge tilslagsprocenten i betonen. Udover de lavere omkostninger, bidrager tilslagsmaterialer også til en øget styrke og holdbarhed i betonen sammenlignet med pasta alene. Tilslagsmaterialerne har altså en afgørende effekt på kvaliteten af jordfugtig beton. Betonstyrken i jordfugtig beton er i høj grad afhængig af volumenandelen af tilslag pr. kubikmeter beton. Som tidligere beskrevet vil styrken i en jordfugtig beton reduceres ved øget porøsitet. Derfor starter proportionering af en betonrecept med at finde den tætteste pakning af den jordfugtige betons tilslag.

■ Pakningsgrad

For at kunne beskrive pakningen, introduceres udtrykket "pakningsgrad". Pakningsgraden af tilslag kan udtrykkes som mængden af faststofvolumen i forhold til total volumen, som vist på figuren nedenfor.

Figur 45 –
Eksempel på pakning af tilslag. a) er en beholder fyldt med et tilslagsmateriale. b) illustrerer mængden af hulrum og faststof i beholderen.



Pakningsgraden findes ved at fylde en beholder med tørt tilslagsmateriale. Materialet komprimeres nu så tæt som muligt, ved en kombination af slag og vibrationer. Herefter findes pakningsgraden af tilslagsmaterialet også kaldet "egenpakningen", ved følgende beregning [29]

Parameterbeskrivelse	Beregning/Værdi
Egenpakning	$(m_1 - m_2) / (V \cdot \rho)$
Vægt af beholder med tilslagsmateriale	m_1 , angives i [kg]
Vægt af beholder uden tilslagsmateriale	m_2 , angives i [kg]
Volumen af beholder	V , angives i [m ³]
Korndensitet af tilslagsmateriale	ρ , angives i [kg/m ³]

Egenpakningen beskriver altså hvor meget tilslagspartiklerne udgør af beholderens volumen og dermed indirekte hvor stort et hulrum, der skal fyldes med pasta. Pakningsgraden kan altså findes for alle tilslagsmaterialer ved dette simple forsøg.

Alle tilslag har ikke den samme pakningsgrad, og derfor kan et skift til et andet tilslagsmateriale betyde at mængden af pasta skal ændres for at opnå samme konsistens. En høj egenpakning kræver mindre pasta for at opnå en god komprimerbarhed af betonen og omvendt for en lav egenpakning. Derfor ses derfor et eksempel på typiske danske tilslagsprodukter og deres egenpakning.

Figur 46 viser tilslagsmaterialer med vidt forskellig geometrisk udformning og størrelsesfordeling. Ved nærmere undersøgelse ses det også at tilslagets geometriske udformning og størrelsesfordeling er afgørende for egenpakningen. Det er derfor nødvendigt at beskrive tilslagsmaterialernes geometriske udformning, kornstørrelsesfordeling samt hvad en ændring af disse parametre har af betydning for pakningen af tilslag, komprimerbarheden og ikke mindst betonens friske egenskaber.

Materialnavn	Interval kornstørrelse (mm)	Målt egenpakning
Søsand	0 – 1	0,62
Søsand	0 – 4	0,68
Bakkesand	0 – 4	0,66
Bakkegrus	0 – 8	0,69
Søsten	4 – 8	0,65
Søsten	8 – 16	0,62
Søsten	16 – 32	0,61
Bakkesten	4 – 8	0,60
Bakkesten	8 – 16	0,60
Bakkegranit	8 – 12	0,59
Klippegranit	8 – 16	0,58




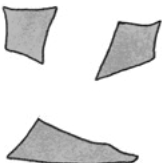


Figur 46 – Typiske værdier for målt egenpakning for danske tilslagsmaterialer [29].

– Tilslagstyper

Tilslagsmaterialer udvindes i grusgrave, på havbunden eller fra stenbrud. De forskellige kilder, udvindingsmetoder og sammensætninger gør at tilslagsmaterialerne varierer på de fysiske, kemiske og mineralogiske egenskaber. Disse variationer i tilslagets sammensætning har også betydning for betonens kvalitet. Nogle af de parametre, som er mest relevante for produktionen af jordfugtig beton til betonvarer, er beskrevet i det følgende afsnit. Det vurderes at tilslagets fysiske- og kemiske egenskaber i de fleste tilfælde kan vurderes på følgende parametre: densitet, absorption, overfladekarakter, frostbestandighed og alkalisk reaktivitet.

I Danmark inddeles tilslag typisk efter tre hovedgrupper, nemlig granitskærver, bakke- og sømaterialer. De forskellige grupper giver forskellige egenskaber til betonen, som afhænger af materialets geometriske udformning. De forskellige grupper varierer typisk på kantethed og overfladekarakter [21]. Kantethed og overfladekarakter bedømmes ved visuel vurdering. Kantethed inddeles i tre kategorier, skarpkantet, kantrundet og afrundet, mens overfla-

dekarakteren inddeles efter glat eller ru [21]. Dette er illustreret i nedenstående figur, for forskellige typer af korn.

Ru			
Glat			
	Skarpkantet	Kanrundet	Afrundet

Figur 47 – Inndeling af partikler efter kantethed og overfladekarakter [21].

Partiklernes kantethed og overfladekarakter har stor betydning for tilslagets evne til at opnå en god tæt pakning.

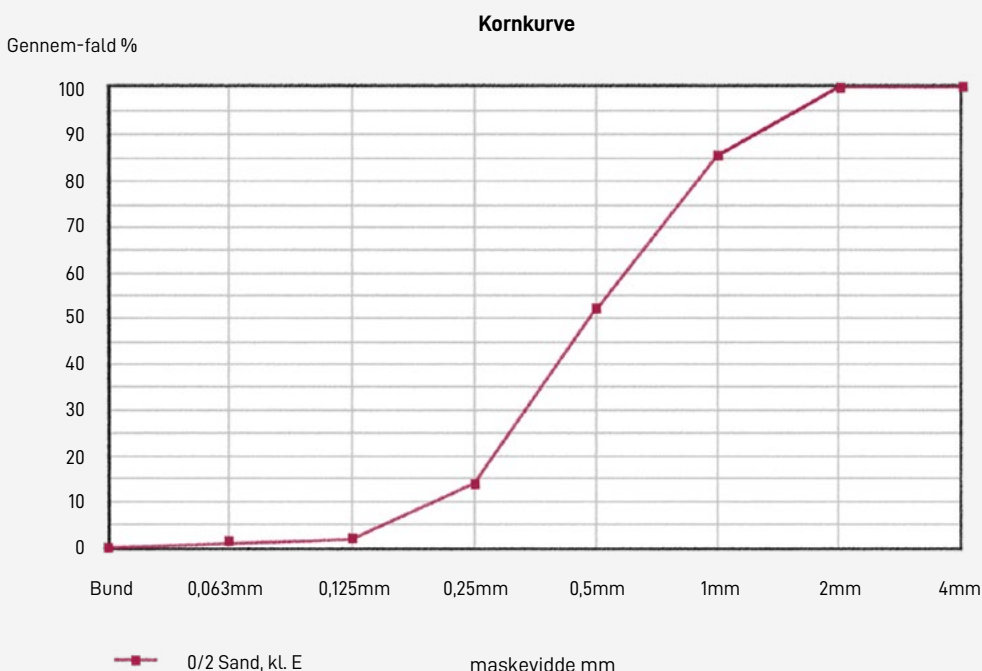
Granitskærver er ofte skarpkantede og ru, da de er udvundet ved sprængning af fjeld. Det betyder at de har sværere ved at opnå en tæt pakning. De har derfor også den laveste egenpakning jf. Figur 46. Granitskærver kræver derfor også mere energi fra komprimering og vibrering for at opnå den samme komprimeringsgrad i en jordfugtig beton, sammenlignet med sømaterialer. Dog vil de skarpkantede tilslagspartikler øge formstabiliteten. Herudover er den ru overflade med til at sikre god vedhæftningen mellem pasta og tilslag, og dermed gode styrkeegenskaber.

Bakke-materialers geometriske udformning varierer ofte, da de udvindes fra grusgrave, hvor tilslagspartiklerne stammer fra mange forskellige aflejringer. Typisk vil materialerne dog være mindre kanrandede og ru sammenlignet med granitskærver, hvilket giver en højere egenpakning.

Sømaterialer er ofte afrundede og glatte, fordi havbunden over tid sli-ber tilslagspartiklernes overflade. Det betyder at sømaterialerne giver en høj egenpakning sammenlignet med de andre typer af tilslagsmaterialer [29]. En jordfugtig beton med sømaterialer kræver derfor mindre energi fra komprimering og vibration for at opnå den samme komprimeringsgrad som beton med granitskærver. Dog vil de afrundede tilslagspartikler reducere formstabiliteten.

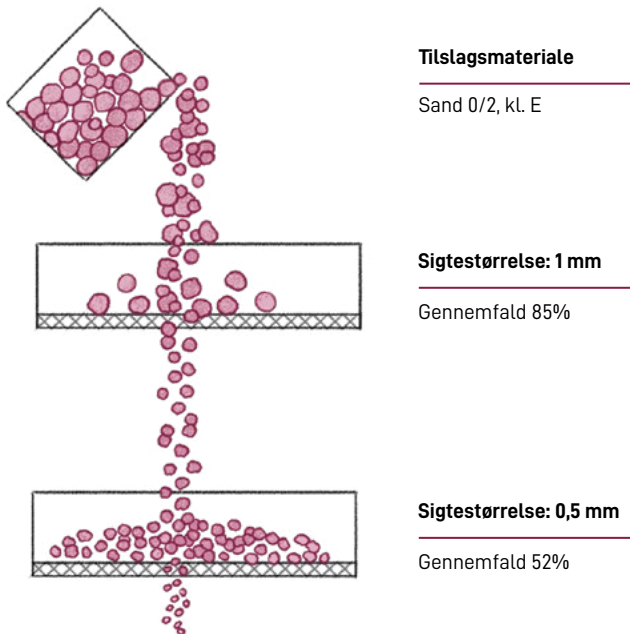
■ Størrelsesfordeling

Størrelsesfordelingen af et tilslagsmateriale fortæller hvordan materialet er sammensat af forskellige partikelstørrelser. Størrelsesfordelingen illustreres ofte som en kornkurve. En kornkurve viser hvor mange masseprocent af en udtaget tilslagsprøve, der falder igennem forskellige sigtestørrelser. Et eksempel på dette er givet herunder.



Figur 48 – Eksempel på kornkurve, 0/2 Sand, kl. E.

På figur 48 ses kornkurven for en dansk sandtype. Det viser bl.a. at 100% af dette sand, har en kornstørrelse mindre end 2mm. Kornkurvens resultater findes som vist på figuren herunder.



Figur 49 –
Eksempel på sigteanalyse af tilslag.

På figuren ovenfor ses det hvordan den største sigte placeres øverst, hvorefter der kan tilføjes mindre sigtestørrelser under. Sigteresten i de valgte sigtestørrelser vejes og på denne måde kan tilslagets størrelsesfordeling beskrives.

Størrelsesfordelingen har også betydning for pakningen af tilslagsmaterialer. En meget smal størrelsesfordeling f.eks. 0/2mm, giver anledning til lav egenpakning. Derimod vil en bredere størrelsesfordeling f.eks. 0/4mm, give anledning til en høj egenpakning. Dette ses også på Figur 46.

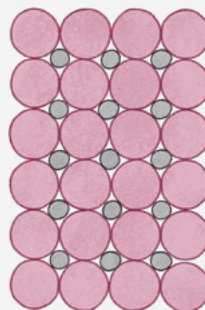
For at kunne vise hvordan størrelsesfordelingen påvirker pakningen af betonen, er der i dette afsnit lavet nogle forsimplerede skematiske illustrationer. Disse illustrationer er ikke et billede af rigtige tilslagspartikler, men giver en idé om størrelsesfordelingens effekt på pakningen vist med kugleformede partikler på figur 50.

Figur 50 –
Eksempel på pakning
af kugleformede
partikler. Partiklerne er
markeret med farve og
hulrummet er det hvide
areal imellem.



Partikler af samme størrelse:

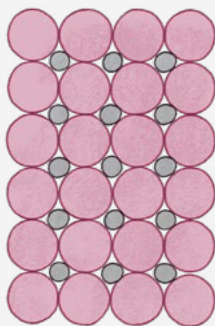
Stort hulrum



Kombination af to størrelser:

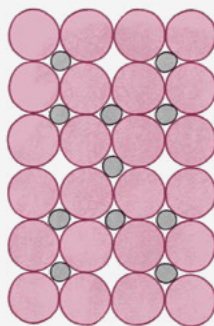
Reduceret hulrum

Hulrummet mellem partiklerne til venstre på figuren ovenfor kan ikke fyldes ud, så længe de kugleformede partikler har samme størrelse. Dette skaber altså et stort hulrum. På figuren til højre er den samme beholder tilsat nogle kugleformede partikler, som passer ind i hulrummet. Kombinationen af partikler i flere størrelser reducerer altså hulrummet, og egenpakningen bliver derfor højere. Det er vigtigt at der er tale om en jævn størrelses fordeling. For mange store partikler vil øge hulrummet, mens for mange små partikler vil skubbe de store partikler fra hinanden. Begge tilfælde vil resultere i en lavere pakning, se figuren herunder.



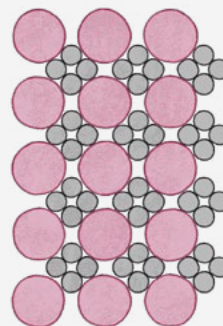
Optimal størrelsesfordeling

Optimal pakning



Få små partikler

Reduceret pakning



Mange små partikler

Reduceret pakning

Figur 51 – Størrelsesfordelingens indflydelse på pakning.

– Pakningsoptimering - Samlet kornkurve

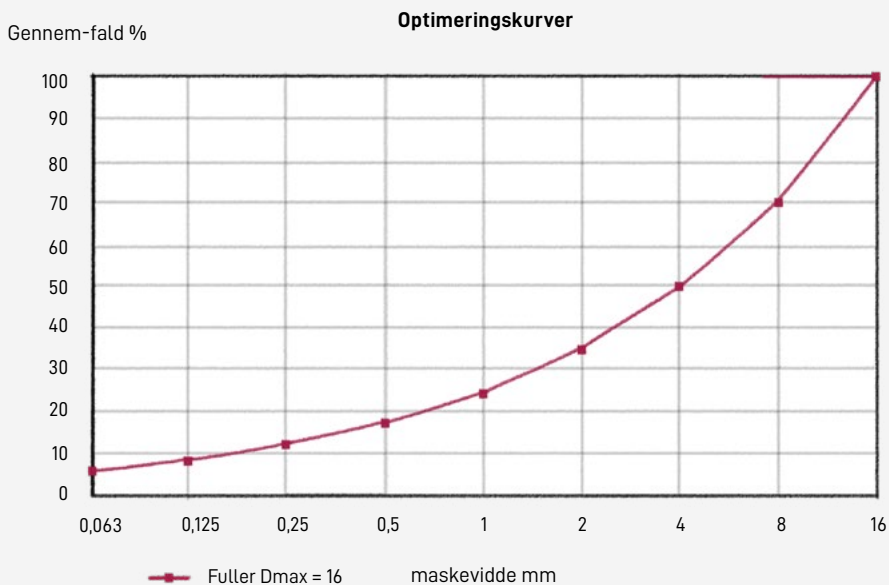
Tilslagets størrelsesfordeling og geometriske karakteristika, vil som vist have en effekt på kvaliteten af betonvarer produceret med jordfugtig beton.

Da andelen af tilslagsmaterialer i betonen ofte udgør over 70% af betonen samlede volumen, vil det være nærliggende at optimere på tilslagssammensætningen som det første i proportioneringsfasen. Flere producenter starter oftest med at anvende tilslagssammensætninger, som erfaringsmæssigt giver en god pakning samt pæne overflader. Dette fungerer godt i praksis for producenter, som modtager tilslagsmaterialer, hvor overfladekarakter og sammensætning er stabil over en lang periode. Er producenten derimod ude for at tilslagsproduktets sammensætning og overfladekarakter ændres pga. produktionsmetode eller udvindingskilde, vil det være nærliggende at få lavet en optimeret sammensætning af de tilgængelige tilslagsmaterialer.

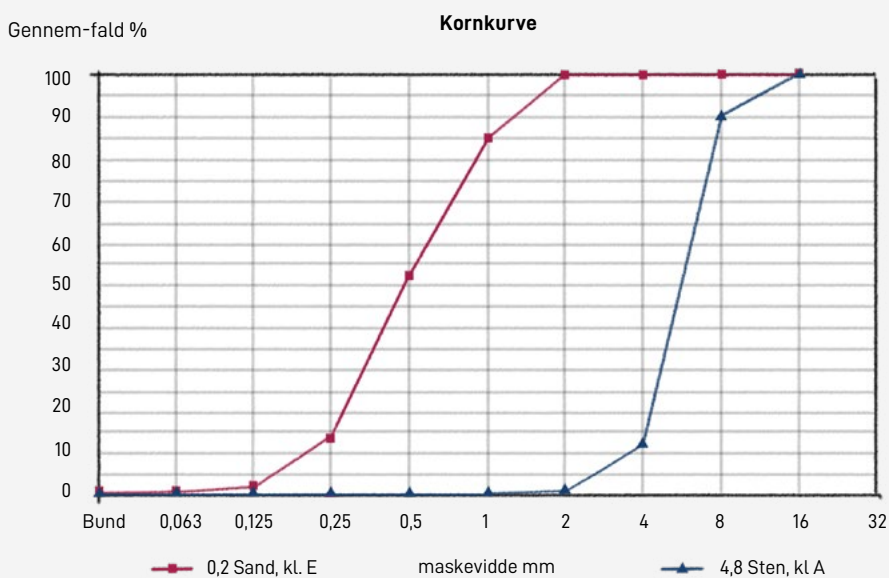
Først introduceres en metode til at optimere valget af tilslag ved at undersøge den sammensatte kornkurve. Den sammensatte kornkurve findes ved at kombinere kornkurven for de valgte sand- og stenmaterialer. Det er muligt at optimere tilslagssammensætningen ud fra bl.a. udseende af overflader, komprimeringsevne eller pakningsgrad. I dette tilfælde undersøges de forskellige tilslagsmaterialer for den kombination, som bidrager til den højeste pakning. Eftersom partiklernes indbyrdes størrelsesfordeling har betydning for pakningen af partikler, kan der opstilles modeller for den teoretisk mest optimale kornkurve. Et fornuftigt bud på en sådan optimeringskurve kan være Fuller-kurven eller nyere modeller fra 1980 præsenteret af Funk og Dinger [34], jf. figur 52.

Figur 52 illustrerer hvordan en ideel kornkurve sammensættes med henblik på at få den højeste mulige pakningsgrad. Modellen tager højde for størrelsesfordelingen af tilslagspartiklerne.

Ved proportionering af jordfugtig beton kan disse optimeringskurver anvendes til at opnå en tilslagssammensætning med god pakning. Ofte har betonvareproducenter flere tilslagsmaterialer, og det gælder derfor om at sammensætte sand- og stenfraktionerne så den sammensatte kornkurve tilnærmer sig optimeringskurverne. Herunder ses et eksempel på en sand- og stenfraktion med tilhørende kornkurver.



Figur 52 – Ideel tilstræbt kornkurve.



Figur 53 – Eksempel på kornkurver for sand og sten.

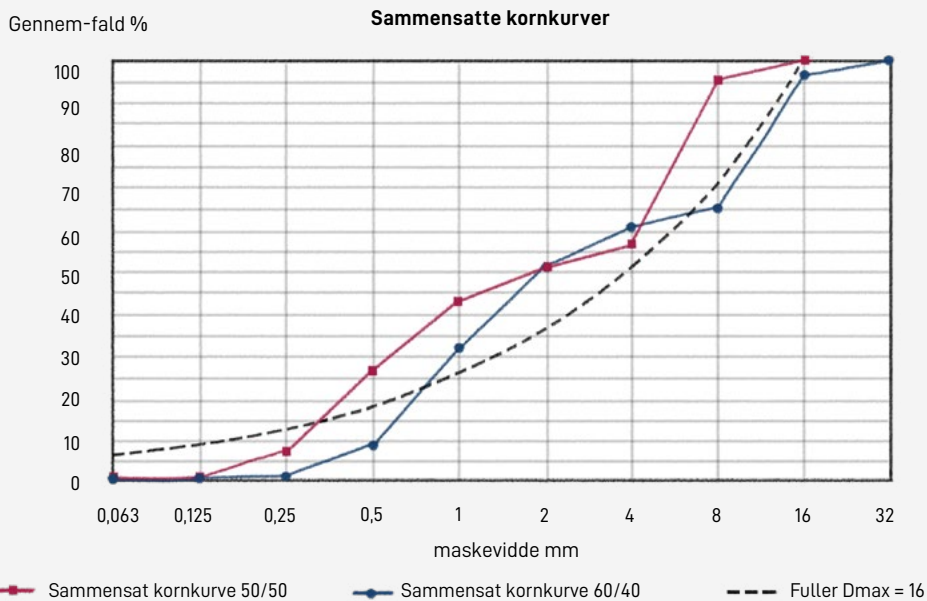
Ved at justere på doseringsforholdet mellem sand og sten, kan producenten opnå den sammensætning, som iht. optimeringskurverne giver den bedste pakning. Når to tilslagsmaterialer kombineres, kan den samlede kornkurve beregnes som følgende.

Betegnelse	Beskrivelse/Beregning
$g_i = p_a \cdot g_a + p_b \cdot g_b$	Den samlede gennemfaldsprocent ved en valgt sigtestørrelse
g_a	Gennemfaldsprocenten for tilslagsmateriale "a" for en valgt sigtestørrelse
g_b	Gennemfaldsprocenten for tilslagsmateriale "b" for en valgt sigtestørrelse
p_a	Procentvis tilsætning af tilslagsmateriale "a"
p_b	Procentvis tilsætning af tilslagsmateriale "b"

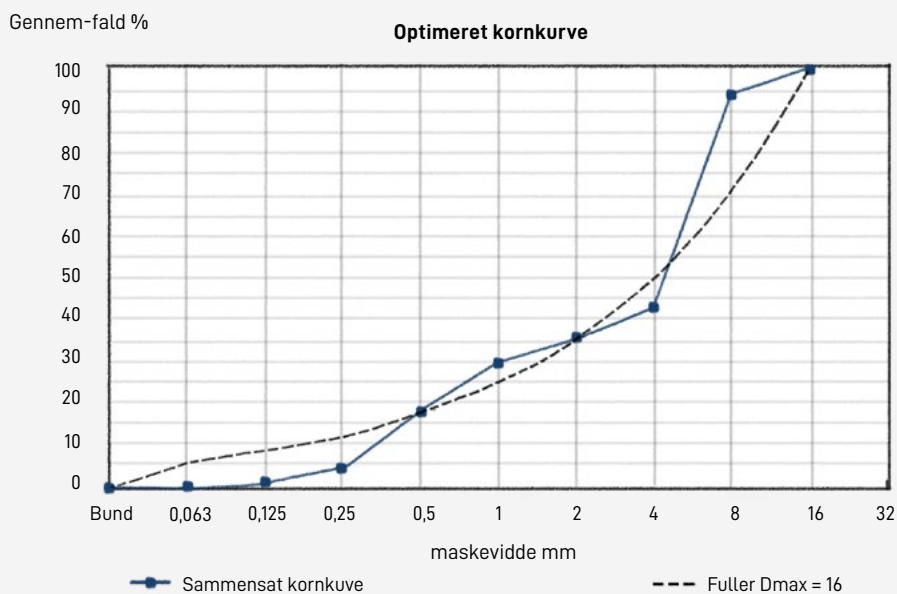
Et eksempel på dette kan laves for de to tilslagsmaterialer, som vist tidligere. Figur 54 viser hvordan den samlede kornkurve ser ud, hvis tilslagsmaterialerne sammensættes med et sand/sten-forhold på enten 60/40 eller 50/50.

For at opnå den bedste pakning, skal tilslagsmaterialerne fordeles således at den samlede kornkurve ligger så tæt på den optimale kurve som muligt. Ved at justere på sand/sten forholdet, kan producenten finde den tilslags-sammensætning, som giver den teoretisk bedste pakning. På figur 55 ses den sammensatte kornkurve, som bedst tilnærmer sig optimeringskurven.

På figur 55 ovenfor ses en sammensat kornkurve for de to tilslagsfraktioner. Doseringsforholdet sand/sten er varieret indtil den sammensatte kurve matcher optimeringskurven bedst muligt. For de valgte tilslagsmaterialer er det ca. 35/65. I de fleste tilfælde er betonproducenter afhængige af at deres produkter har en ensartet overflade.



Figur 54 – Sammensætning af to tilslagsmaterialer med forskellige sand/sten forhold.



Figur 55 – Eksempel på optimeret sammensat kornkurve.

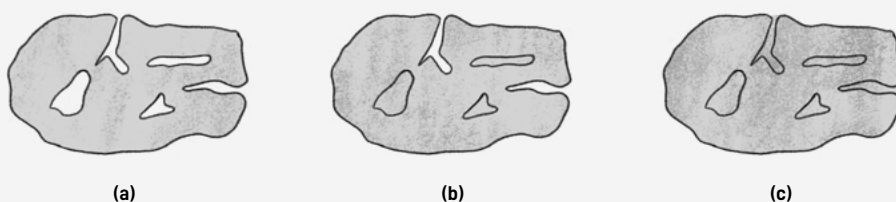
I jordfugtige betoner vil der ved underskud af pasta og fine tilslagspartikler være øget risiko for at de grove tilslagspartikler > 4mm kommer til syne i overfladen. Derfor tilsætter producenterne væsentlig mere sand end sten i deres produkter, sammenlignet med den optimale pakning. I flere tilfælde er der tale om et sand/sten forhold på 70/30. Dette vil selvfølgelig have en betydning for komprimeringsgraden i betonen. Pakningsoptimering er en meget teoretisk tilgang til receptoptimering, og kan anvendes til at vurdere optimeringspotentialet. Erfaring viser at der sagtens kan produceres god beton, som afviger fra den optimale pakning med større sandindhold end det, som er fundet ved pakningsoptimeringen. I disse tilfælde vil det dog være nødvendigt at øge pastaindholdet svarende til det øgede hulrumsvolumen, samt undersøge om v/c-forholdet er passende til recepten. Det er selvfølgelig billigere at anvende sand frem for sten i betonrecepten, dog vil det øgede pastaindhold give et større cementindhold, som i sidste ende giver en dyrere betonrecept. Et alternativ er at designe betonvareprodukterne med et pudslag, som består af sand og cement. Under pudslaget kan der støbes en såkaldt bagbeton, som er mere optimeret ud fra den bedste pakning.

Erfaring viser at sandet varierer væsentlig mere end sten fraktionerne, når der er tale om vandbehov. Sands vandbehov siger noget om hvor meget vand der skal til, for at opnå en bestemt konsistens, og forsøg viser at vandbehov og pakningsgrad hænger sammen. Der bør altså være et øget fokus på om sandet ændrer pakningsgrad over tid eller ved anvendelse af ny leverandør eller et nyt produkt. Da paknings-graden i tilslaget har en direkte betydning for komprimeringsgraden i den jordfugtige beton er det en vigtig parametre at overvåge.

En anden metode til optimering af tilslagssammensætningen, er at benytte matematiske modellerings principper, som baseres på størrelsesforhold, egenpakning og overfladekarakter. Denne optimering kan også med fordel udføres ved hjælp af en række IT beregningsprogrammer, som findes i både simple og mere detaljerede versioner. IT Programmerne kan hurtigt simulere alle de mulige kombinationer af 2-3 forskellige tilslagsmaterialer. Derved får producenten et godt estimat på den bedste tilslagssammensætning. Samtidig er det muligt at se hvilken effekt en ændring af tilslagets sammensætning potentielt kan have på den jordfugtige beton. Eksempler på sådanne værktøjer kan findes i [34] hvori det danske program 4C-Packing udviklet af DTI er nævnt.

- Densitet og absorption

Densiteten, fugtprocent og absorption i tilslagsmaterialer er vigtige parametre ved produktion af jordfugtig beton. Tilslag indkøbes efter rumfang, doseres efter vægt og proportioneres efter rumfang. Densiteten er derfor en vigtig parameter for at sikre at producenten modtager og doserer de nødvendige mængder tilslag ud fra de valgte betonrecepter. For at kunne beskrive og beregne densiteten er det vigtigt introducere nogle rumfangsdefinitioner for tilslagspartikler, som ses på figuren herunder.



Figur 56 – Rumfangsdefinitioner [21]. (a) absolut faststof rumfang (faststof), (b) tilsyneladende faststofrumfang (faststof + lukkede porer), (c) kornrumfang (faststof + lukkede porer + åbne porer)

På figuren ovenfor ses tre definitioner af partikelrumfang. Til venstre på figuren (a) og (b) ses det absolutte faststof rumfang samt det tilsyneladende faststofrumfang af partiklen. Disse størrelser anvendes sjældent da de ikke har betydning for tilslagspartiklernes effektive rumfang i betonen. Tilslagspartiklerne bør derimod betragtes som til højre på figuren (c). Her ses kornrumfanget som svarer til det der også kendes som vandmættet overflade tør tilstand (VOT). Denne rumfangsdefinition siger noget om hvor meget en afvejet mængde tilslagspartikler effektivt udgør af betonens volumen. Definitionen svarer til grænsen mellem tilslagspartiklen og pastaen. Denne tilstand anvendes også til at bestemme densitet og absorption. Absorptionen er et udtryk for hvor meget vand der kan være i de åbne porer (b) på figuren ovenfor. Dette vand er ikke tilgængeligt for cementreaktionerne og tæller derfor heller ikke i v/c -tallet. Det absorberede vand findes i tilslagets porer og bidrager derfor heller ikke til komprimerbarheden. Derfor medregnes absorptionsvandet heller ikke i det "frie"- eller "effektive" vand, som er det vand, der blandes med cementen og derved definerer v/c -tallet. Absorption er derfor en vigtig størrelse, som dog er forholdsvis konstant. Værdien deklarerer af tilslagsproducenten og anvendes i blendersystemet.

– Fugtprocent

Tilslagsmaterialer vil have varierende fugtindhold alt efter lagringsforhold, kilde og partiklernes udformning. Fugtindholdet er vigtigt for betonvareproduktionen, eftersom en variation i vandindholdet har stor betydning for betonens komprimeringsevne, som igen påvirker en lang række egenskaber i betonen. Det er derfor vigtigt at produktionsudstyret kan korrigere for variationerne i fugtindholdet. Det totale fugtindhold i tilslag, kan beregnes ved udtørring af en stikprøve af tilslagsmaterialet. Beregningen er vist herunder.

Betegnelse	Beskrivelse/Beregning
m_{ss}	Masse af stikprøve
m_d	Masse af tør prøve
$w_{(\%,\text{tilslag})} = \frac{m_{ss} - m_d}{m_d} \cdot 100\%$	Fugt-%, tilslag

Ved at trække absorptionen fra fugtprocenten i det enkelte tilslagsmateriale, kan det "frie vandindhold" beregnes. Er fugtprocenten mindre end absorptionen vil tilslagsmaterialet suge vand når det blandes i betonen. Hvis fugtprocenten derimod er større end absorptionen vil tilslagsmaterialet tilføre vand til betonen. Dette skal bl.a. anvendes til at korrigere vandindholdet når der skal afmåles til en blandesats, se et eksempel på dette i afsnittet omkring proportionering af beton.

– Frostbestandighed

Nogle tilslagstyper kan indeholde korn, som har et meget fint poresystem. Når poresystemet er meget fint, vil det have en øget absorptionsevne. Denne vandabsorberende egenskab vil ved temperaturer under frysepunktet øge risikoen for frostskeer i betonen. Ved frysning udvider kornet sig og kan derfor forårsage revner i betonen.

Til konstruktionsbeton er der fastsat nogle øvre grænser for indholdet af lette korn for at opnå en frostbestandig tilslagssammensætning. Disse øvre grænser kan også anvendes som en god retningslinje til produktion af jordfugtige betonvarer, se figur 57. Der sættes ikke krav til betonvareproducenterne om at anvende frostbestandige tilslagsmaterialer. Det er samtidig svært for producenterne at vide om produkterne bliver udsat for frostpåvirkning, da de bliver

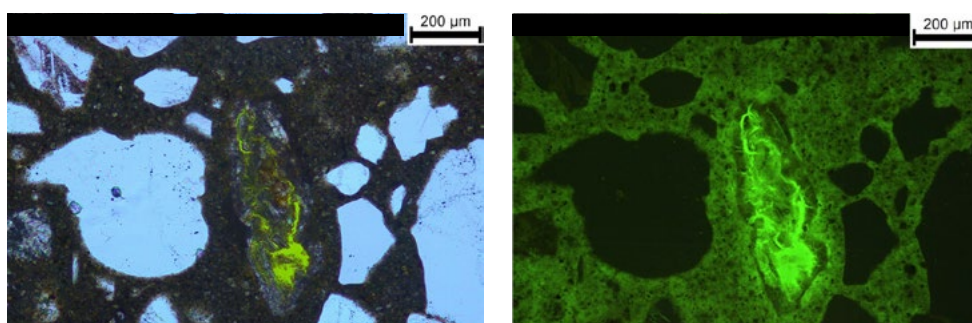
Øvre grænse for lette korn jf. [24] Anneks E	
Miljøpåvirkning	Indhold af lette korn iht. DS 405.4
Passiv, P	Intet krav
Moderat, M	Maks. 5 % Lette korn under 2400 kg/m ³
Aggressiv, A	Maks. 1 % Lette korn under 2400 kg/m ³
Ekstra Aggressiv, E	Maks. 1 % Lette korn under 2500 kg/m ³

Figur 57 – Grænser for indhold af lette korn [24]

produceret som lagervarer og ikke til en bestemt anvendelse. Usikkerheden omkring anvendelsen gør at producenterne altid bør anvende tilslagsmaterialer svarende til miljøpåvirkning A og E. Betonvareproducenterne skal også ved løbende typeprøvninger teste deres produkter for frost-bestandighed. Prøven vil også vise om indholdet af lette korn giver en risiko for afskalninger ved frost-tø påvirkning af den hærdnede beton.

– Reaktiv kisel

Betonvarer kan tage skade af såkaldte alkalikiselreaktioner også benævnt "AKR". Den skadesmekanisme opstår ved en kemisk reaktion mellem tre elementer: Reaktiv kisel fra tilslagsmaterialer + Alkali ioner fra cement, vejsalt eller havvand indeholdende salte + vand fra blanding og senere eksponering. Hvis disse tre elementer er til stede i betonen, kan der opstå en kemisk reaktion, som resulterer i en såkaldt alkali-kisel-gel. Hvis denne gel får mulighed for at absorbere vand, kan den svulle og skabe skadelige indre spændinger i betonen, se eksemplet herunder.



Figur 58 – Eksempel på en reaktiv tilslagspartikel som har dannet ekspanderende gel.

På figur 58 ses et tyndslip fra en beton behandlet med epoxy. Epoxybehandling udfylder eventuelle porøsiteter og revner, som ved UV-belysning giver en lysegrøn farve. Jo højere porøsitet, desto mere lysegrøn farve. De lysegrønne farver fremhæver især v/c-forhold og homogenitet af betonen, men viser også tydeligt geldannelse, revner, luftporer, mm. Figuren ovenfor viser et klassisk eksempel på en tilslagspartikel af reaktiv kisel. Hvis der forekommer reaktiv kisel i betonen i kombination med alkali og vand, kan dette under rette forhold reagere og danne alkali-kisel-gel. Alkali-kisel-reaktioner er derved en sekundær udfældning, hvis reaktionsprodukt fylder mere ved absorption af vand. Derved kan der forekomme revnedannelse i betonen pga. de indre spændinger som alkali-kisel-gelen skaber i betonen.

Reaktiv kisel vil i danske grus forekomster typisk stamme fra porøs flint. For at undgå disse reaktioner bør betonvareproducenter anvende tilslagsmaterialer, som ikke indeholder store mængder af porøs flint. Ved at anvende tilslagsmaterialer, som er klassificeret M, A og E iht. [24], vil tilslagsmaterialerne have et begrænset indhold af porøs flint og dermed en begrænset risiko for AKR. Tilslagsmaterialerne i de forskellige klassificeringer er nemlig testet for en lang række egenskaber, som reducerer risikoen for disse skademechanismer. For nærmere information om disse testmetoder henvises der til det danske tillæg til beton standarden DS/EN 206 DK NA, Anneks E [24].

– Miljøpåvirkninger

For at imødekomme betonproducenternes behov, vælger tilslagsproducenterne i Danmark ofte at markere deres produkter efter hvilken miljøpåvirkning de kan anvendes i. Miljøpåvirkningen beskriver en række eksponeringer, som betonen kan udsættes for. Ved at angive at et tilslagsmateriale er et "M-tilslag", betyder det at tilslagsmaterialet egner sig til de eksponeringer, som Moderat miljøpåvirkning dækker over. P-materialer er de billigste materialer med tilsvarende lavere kvalitet, hvorimod E-materialer er dyre med tilsvarende høj kvalitet. Kvaliteten vægtes bl.a. ud fra tilslagsmaterialernes styrke- og holdbarhedsegenskaber. Betonvareproducenter bør derfor vælge tilslagsmaterialer, som svarer til den ønskede kvalitet. Vælges materialerne med ringe kvalitet øges risikoen for reduceret produktkvalitet og reklamationer. I skemaet nedenfor ses en oversigt over, hvad de forskellige miljøpåvirkninger dækker over i praksis.

Sammenfattet beskrivelse af miljøpåvirkninger	
Miljøpåvirkning	Praktisk beskrivelse
Passiv, P	Indendørs helt tørre konstruktioner, eller beton permanent under vand. Fx indendørs gulve og vægge, jorddækkede fundamenter uden krav til armering, etc.
Moderat, M	Konstruktioner, der eksponeres for fugt og frost uden anvendelse af tøsalt. Fx vådrum, udvendige lodrette overflader, jorddækkede fundamenter med krav til armering, etc.
Aggressiv, A	Konstruktioner, der kan eksponeres af skadelige påvirkninger fra chlorider (fra havvand eller tøsalt), frost, og salte eller syre. Uden dørs belægninger, støttemure, udvendige trapper, altanplader, kælderydervægge over terræn, etc. udvendige trapper, altanplader, kælderydervægge over terræn, etc.
Ekstra Aggressiv, E	Konstruktioner, der hyppigt eksponeres af skadelige påvirkninger som klorider, frost og salte eller syre. F.eks. svømmebassiner, marine konstruktioner, vaskepladser, altaner og konstruktioner i stærkt aggressivt grundvand eller jord.

Figur 59 – Praktisk beskrivelse af miljøpåvirkninger.

Letklinker

Udtrykket letklinker anvendes om den type lette tilslagsmateriale, som hyppigt ses anvendt i blokproduktionen i Danmark. Letklinker fremstilles i en rotér-ovn meget lignende den, som er brugt til cementproduktion. Der anvendes en blød plastisk ler-type, der ved opvarmning til temperaturer op til ca. 1400 °C danner utallige små luftblærer, som herved får leret til at ekspandere. Resultatet af opvarmningen og den roterende bevægelse fra ovnen, er en klinkedannelse som vist på figur 60.

Letklinkernes overflade dannes i den sidste del af brændeprocessen og er med til at give letklinkerne deres mekaniske styrkeegenskaber.



Figur 60 –
Eksempel på
letklinkers overflade
og poresystem.

– Kornform

Letklinker leveres i to typer af kornformer, rund og knækket. Letklinkerne er som udgangspunkt afrundede når de produceres, som vist til højre på billedet ovenfor. Letklinker kan dog også fås i en knækket form, hvor letklinker partikler >20mm knuses ned til mindre fraktioner.

– Størrelsesfordeling

Ligesom almindelige tilslagsmaterialer varierer letklinker også i størrelse. Derfor inddeles letklinker også i forskellige størrelser. Udvalget af forskellige størrelser er væsentlig mindre end for almindeligt tilslag og de typiske letklinkerprodukter er derfor opdelt i fint og groft, som vist herunder.

Betegnelse	Partikelstørrelse	Typisk størrelsesfordeling
Fine letklinker partikler	≤4mm	0 – 4mm
Grove letklinker partikler	>4mm	4 – 10mm

Figur 61 – Eksempel på typiske letklinker størrelsesfordelinger..

I enkelte tilfælde kan det være muligt at fremskaffe fraktioner med en smallere størrelsesfordeling f.eks. 0 - 2mm eller 2 - 4mm. Dette er dog ikke behandlet her, da det betragtes som specialprodukter.

Ligesom almindeligt tilslag, kan forskellige letklinker-produkter kombineres, for at skabe den ønskede kornkurve. Det er dog vigtigt at være opmærksom på at letklinker i de fine fraktioner ofte stammer fra flere forskellige sorteringer. Det betyder at variationen på densitet og kornkurve her vil være større end for de grove fraktioner.

- Pakningsgrad

Ud fra metoden for måling af egenpakning beskrevet i [29], er den typiske egenpakning for letklinker målt til følgende.

Betegnelse	Størrelsesfordeling	Pakningsgrad
Fine letklinker partikler	0 – 4mm	0,53
Grove letklinker partikler	4 – 10mm	0,52

Figur 62 – Eksempler på typiske pakningsgrader [52]

Udover størrelsesfordelingen, så har formen også indflydelse på pakningen, ligesom for almindelige tilslagsmaterialer.

- Densitet, styrke og absorption

Som nævnt tidligere består letklinker af ekspanderet ler, hvis høje porøsitet gør det til et meget let materiale. Letklinker leveres efter løs massedensitet, som angives i kg/m^3 . Det er også vigtigt at bemærke at letklinker produceret og CE-mærket efter den tilhørende europæiske produktstandard EN 13055-1 tillader en variation i løs massedensitet på op til +/- 15 vægt-%. Det betyder altså at et let-klinker produkt f.eks. en "LECA 2-4mm rund" med en deklareret løs massedensitet på 380 kg/m^3 må variere mellem $325 - 435 \text{ kg/m}^3$. Det er derfor vigtigt at producenterne regner denne usikkerhed med ind i de løbende variationer i produktionen.

Letklinkernes høje porøsitet gør også at vandabsorptionen er mellem 20 - 35 %. Det betyder altså at der er væsentlig forskel på tørre og vandmættede letklinker, hvilket er afgørende for den korrekte vanddosering i produktionen. Dette er også grunden til at flere producenter har vandingsanlæg på deres letklinkersiloer.

Letklinkernes styrke afhænger i stor grad af den ydre skal på letklinker-partiklerne. De fine letklinker-fraktioner er derfor også typisk stærkere, fordi de har mere overflade pr. volumen, sammenlignet med de grovere fraktioner. Det er dog vigtigt at bemærke at letklinker kan knuses ved for stor belastning i blokstensmaskinen, hvis de påføres en for høj belastning. Knusningsstyrken for letklinker er mellem 0,7 - 1,0 MPa ved 10% deformation [52].

Vand

Vand benyttes til produktionen af beton og er nødvendigt for at cementen kan reagere og derved udvikle betonens egenskaber. Det vand som anvendes i betonproduktionen kaldes for blandevand. Det er dog ikke uden betydning hvilken sammensætning vandet har, når der er tale om blandevand. Vandets kvalitet kan nemlig have betydning for betonens kvalitet igennem hele dens levetid.

– Urenheder

Rent vand, f.eks. almindeligt drikkevand vil altid være egnet til betonproduktion [21]. Vand med indhold af en vis mængde opløst eller opslæmmede stof kan også accepteres uden at det medfører en betydelig ændring af betonkvaliteten. Betonvareproducenter bør dog anvende vand som ikke indeholder fedt, syre, olie, sukker eller store mængder salte. Ved brug af genbrugsvand fra betonproduktion, som også kaldes for "procesvand", eller andre vandkilder, så er det vigtigt at undersøge vandets kvalitet. I [21] er der bl.a. angivet en række krav til vandets indhold af urenheder såsom salte, klorider organiske stoffer mm.

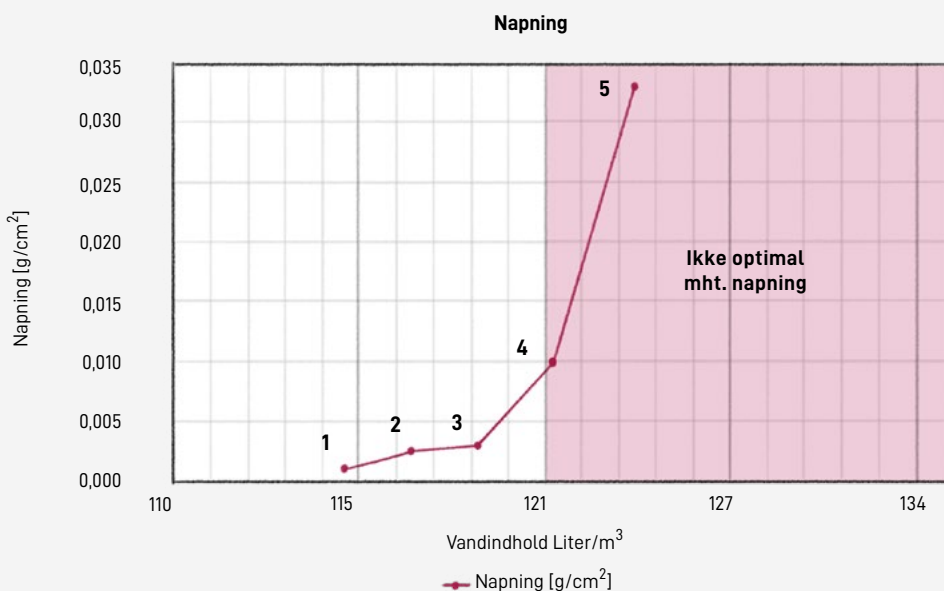
– Vandindhold

I den daglige produktion af betonvarer, justeres vandindholdet for at opnå den rette konsistens. Vandindholdet har betydning for en række egenskaber i den jordfugtige beton herunder styrke, formstabilitet og overfladeudseende. Det er derfor vigtigt at forstå hvor meget vandindholdet kan ændres uden at det har en negativ indflydelse på de ovennævnte parametre. Der er herunder vist et eksempel på den jordfugtige betons overfladeudtryk ved varierende vandindhold.



Figur 63 – Visuel vurdering af overflader ud fra varierende vandindhold.

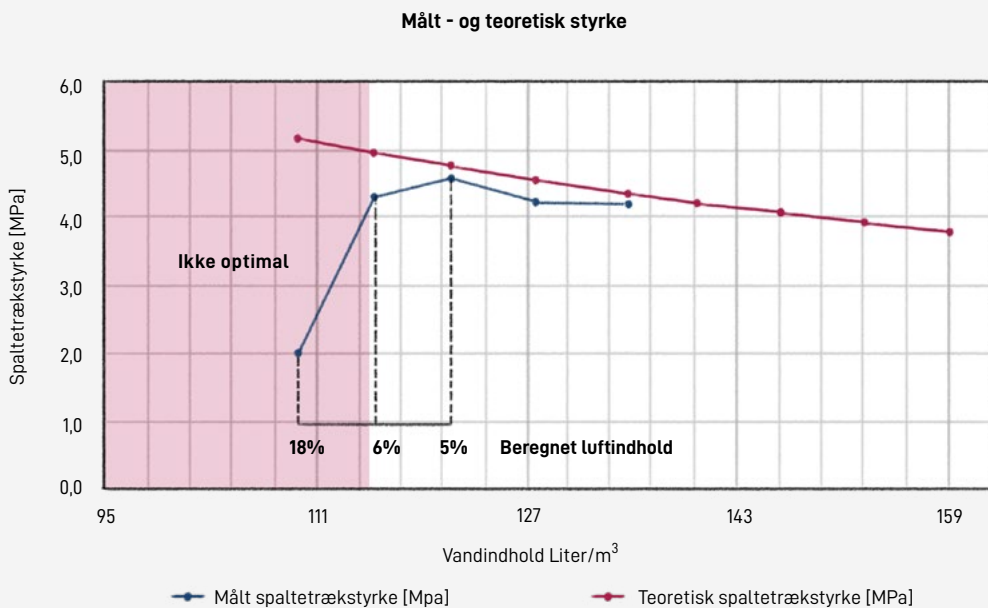
Betonemnerne på figur 63 er produceret med udgangspunkt i den samme recept, hvor mængden af vand er ændret. Betonens pulverkombination består af 275 kg Basis cement og 42 kg Flyveaske. Betonen er støbt ud i en form, hvor betonen udsættes for komprimering og vibrationer. Til højre på figuren ses det prøveemne, som har det største vandindhold. Overfladen viser tydelige tegn på at noget af den jordfugtige beton er blevet siddende på formen efter afformning. Dette fænomen kaldes i Danmark for napning. Betonvareproducenter observerer dette som huller i overfladen direkte efter afformning. Ved laboratorie forsøg, er det forsøgt at måle mængden af materiale, som sidder tilbage på formpladen. Herunder ses resultaterne fra de ovenstående forsøg med varierende vandindhold, hvor napning er vist som funktion af vandindholdet. I forsøgene er cementindholdet fastholdt, og det er kun vandet der varierer.



Figur 64 – Napning ved varierende vandindhold. Cementindholdet er konstant og v/c-forholdet varieres ved at tilsætte forskellige mængder vand.

På figuren ses en tendens til at risikoen for napning stiger relativt hurtigt, når vandindholdet øges. Betonvarer af jordfugtig beton har altså en tendens til at variere i overfladeudseende ved for højt vandindhold, hvilket sætter en øvre grænse for vandindholdet.

Ifølge princippet for napping og vandindhold burde det være en fordel at køre med så lavt vandindhold som muligt til en jordfugtig beton til produktion af betonvarer. Som tidligere nævnt har vandindholdet dog samtidig en stor indflydelse på komprimerbarheden af jordfugtig beton. Komprimerbarheden er tæt forbundet med styrke og porøsitet. Ved at vise spaltetrækstyrken som funktion af vandindholdet ses en tydelig sammenhæng.



Figur 65 – Vurdering af nedre grænse for vandindhold vurderet på luftindhold.

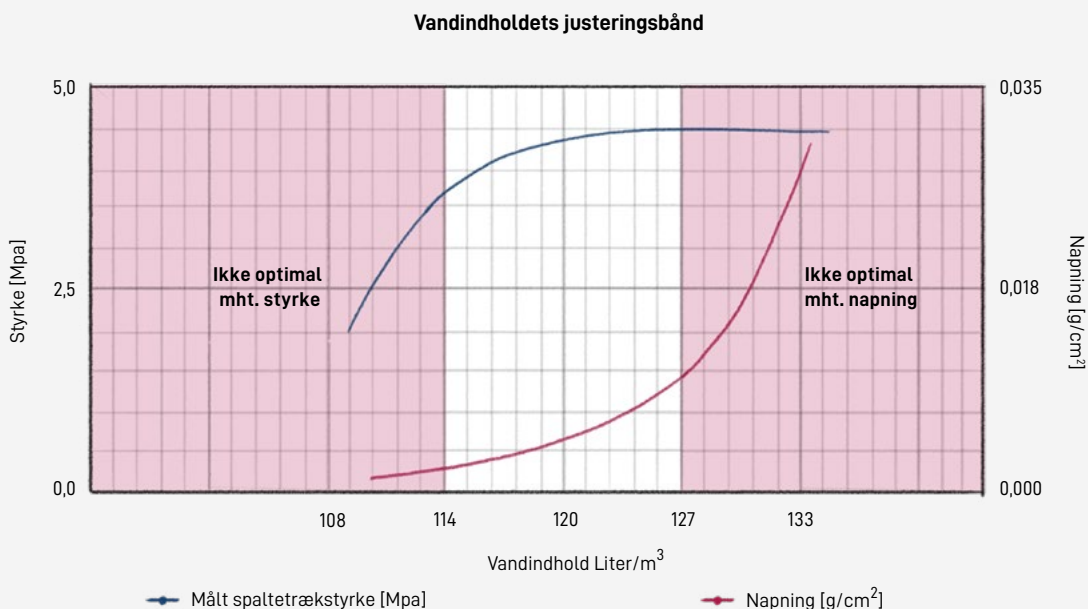
På figuren ovenfor ses resultaterne for spaltetrækstyrken og det målte luftindhold, som funktion af vandindholdet fra det tidligere nævnte laboratorie forsøg. Til sammenligning ses den teoretiske spaltetrækstyrke ved varierende vandindhold med konstant luftindhold.

Når vandmængden reduceres, vil pastavolumen falde tilsvarende. En reduktion af pastavolumen reducerer også komprimerbarheden og som nævnt tidligere, vil en reduktion af komprimerbarheden, øge porøsiteten. Betonproducenterne vil i den løbende produktion se dette som en faldende densitet,

da et højere luftindhold giver lavere densitet. Densiteten kan derfor bruges som styringsparameter for mulige afvigelser i kvaliteten.

Ud fra de afgrænsninger, som har vist sig i laboratorieforsøget, kan der altså opstilles et princip for justeringsbåndet for vandindholdet med konstant cementindhold. Et eksempel på dette ses herunder.

På figuren ses det at vandindholdet kan justeres mellem 114 - 127 Liter/m³ i den jordfugtige beton i dette forsøg. Betonproducenten bør derfor indstille sine doseringstolerancer ud fra dette princip. Ønskes det at øge justeringsbåndet for vandindholdet kan mængder af filler i betonen øges som vist i [39]. I dette forsøg var der anvendt en total pulvermængde på 317 kg. For at have lige store variationsmuligheder til begge sider, kan forholdet mellem vand og pulver (v/p) for denne beton sættes til $120\text{kg} / 317\text{kg} = 0,38$. Det er vigtigt at understrege at v/p-forholdet er et udtryk for mængden af finstof ift. mængde af vand, som ikke er det samme som v/c-forholdet.



Figur 66 – Principskitse for vandindholdets effekt på en laboratoriebeton.

Cement

Cement er et pulver, som hører under kategorien "bindemidler". Nærmere bestemt er cement et "hydraulisk bindemiddel", hvilket betyder at det reagerer kemisk med vand og hærdner. Der findes flere forskellige cementtyper, som har forskellige sammensætninger og egenskaber. I Danmark er det tilladt at anvende de almindelige cementtyper angivet i figuren nedenfor, uden at skulle dokumentere cementens egenskaber.

Typiske cementer i Danmark		
Hovedtyper	Undertyper	
CEM I	Portlandcement	I
CEM II	Portland flyveaskecement	II/A-V
		II/B-V
CEM II	Portland kalkstencement	II/A-L II/A-LL
CEM II	Portland kompositcement	II/B-M (Q-LL)

Figur 67 – Cementtyper der kan anvendes uden særskilt dokumentation [24].

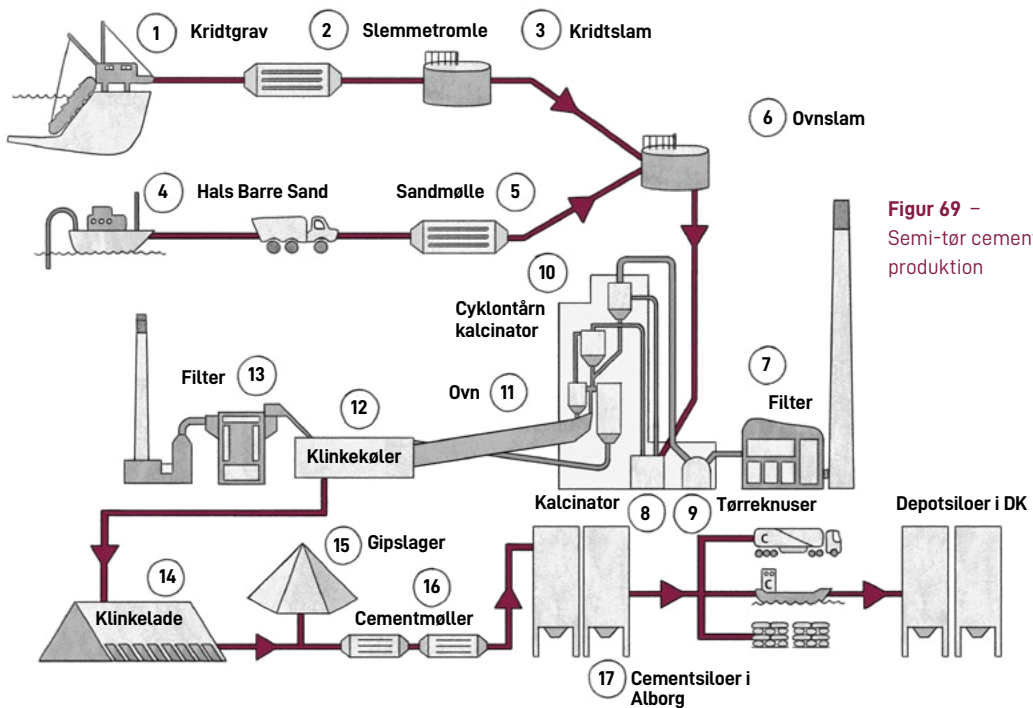
Indenfor de enkelte cementtyper kan de enkelte cementleverandører have forskellige typer af produkter, som er baseret på en specifik egenskab/funktion. En liste over typiske produktbeskrivelser af cementer ses herunder.

Produktbeskrivelser af cementprodukter	
Beskrivelse	Fordele
Hurtighærdende cement	Kortere lagringstid og hurtigere styrkeudvikling
Sulfatbestandig cement	Øget holdbarhed i sulfatholdige miljøer såsom, havvand, mose vand og spildevand.
Lavalkali cement	Øget bestandighed imod alkali-kisel-reaktioner.
Lavvarme cement	Reducerer risikoen for termorevner i massive betonkonstruktioner.

Figur 68 – Produktbeskrivelser af cementer

De forskellige portlandcementer produceres ud fra samme procesprincipper. De enkelte producenter har dog mulighed for at sammensætte deres produkter efter hvilke tilgængelige råvarer der findes lokalt. Produktionen af portlandcement kan generelt opdeles i tre processer hhv. homogenisering af råmaterialer, fremstilling af portlandcementklinker og formaling af portlandcementklinker.

I Danmark produceres alt grå cement på et såkaldt semi-tørt anlæg, som vist på procesdiagrammet herunder.



Figur 69 –
Semi-tør cement
produktion

Første proces starter først ved at udvinde kridt og sand, se punkt 1-5.

Herefter opslæmmes råmaterialerne til en ovnslem, se punkt 6. Alt efter hvilket produkt der fremstilles, kan der tilsættes mindre dele af forskellige jern- og aluminiumskilder i enten ovnslem eller cyklontårnet.

Anden proces starter når ovnslemmet er homogeniseret og blæses ind i en tørreknuser, som udtørre og pulveriserer ovnslemmet, se punkt 9.



Figur 70 – Udvinning af kridt med skovthjulsgraver (th.) og dybdegraver (tv.)

Den pulverformede råblanding passerer herefter igennem cyklonerne, som opvarmer pulveret og transporterer det ind til kalcinatoren hvor det opnår en temperatur på omkring 800 °C, se hhv. pkt. 10 og 8. Den kalcinerede råblanding fødes nu til roterovnen, hvor klinker brændingen foregår, se punkt 11. Roterovnen drejer langsomt rundt og er indstillet med en hældning, så materialer langsomt løber ned mod brændezonen. Her opstår en sintring eller smeltning af materialerne i det at de nærmer sig brændezonens temperatur som er et sted mellem 1200 °C - 1500 °C. Ved brændezonen er dannelsen af portlandcementklinkerne komplet og processen afsluttes ved at afkøle klinkerne, se punkt 12.



Figur 71 – Eksempel på rotér ovn (tv.) og formation af portlandcementklinker i brændezonen (th.)

Tredje proces starter ved formalingen af klinkerne. Klinkerne formales i en kuglemølle fyldt med stålkugler, som roterer ved høj hastighed. Stålkuglerne knuser klinkerne til et pulver, som bliver finere jo længere tid møllen kører, se punkt 16.



Figur 72 – Eksempel på kuglemølle (tv.) og malelegemer af legeret stål (th.)

Finheden er en vigtig styringsparameter ved cementproduktionen. Under mølleprocessen tilsættes nogle få procent gips, for at kontrollere cementens afbinding og styrkeudvikling, se punkt 15. Igennem disse tre processer, opnår cementen de egenskaber, som er vigtige i betonproduktionen. Enkelte egenskaber for cementen, som vurderes at være vigtige for produktionen af jordfugtig beton til betonvarer, uddybes yderligere i de følgende afsnit.

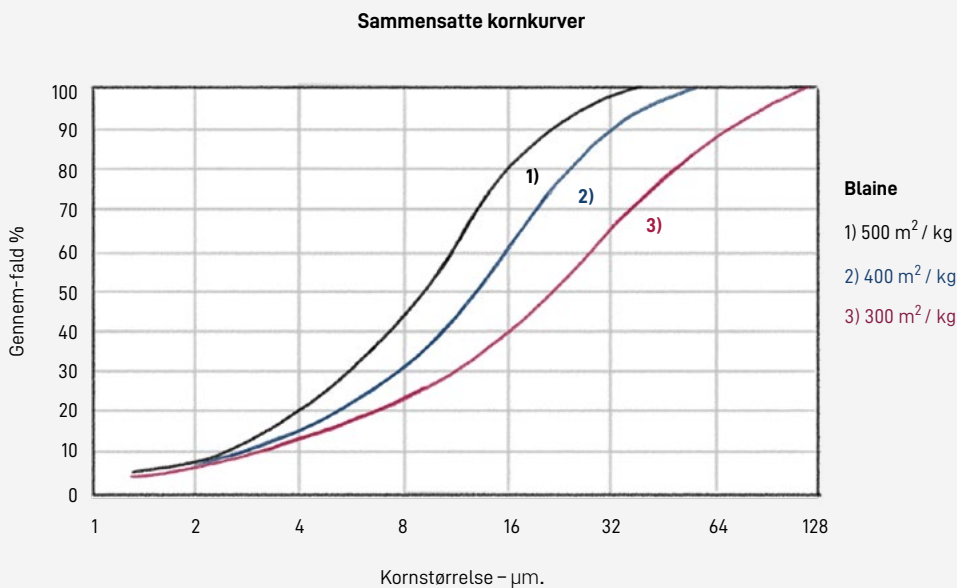
■ Fysiske og kemiske karakteristika

Betonens kvalitet er i høj grad afhængig af delmaterialernes sammensætning, og her er cementen ingen undtagelse. Cementens geometriske-, fysiske og kemiske karakteristika såsom kornstørrelsesfordeling, finhed, styrkeudvikling og alkali-indhold, uddybes derfor herunder.

■ Finheden

Finheden af cement har også indflydelse på cementens egenskaber. Finheden måles efter hvor stort et overfladeareal cementen har pr. vægtenhed. Denne værdi kaldes for "Blaine" og udtrykkes i enheden m^2/kg . I cementproduktionen styres dette i formalingsprocessen. Finheden af cement hænger også sammen med kornstørrelsesfordelingen. Finheden kan altså øges, ved

at formale cementklinkerne til meget små størrelser. Dette ses også på kurven herunder, hvor kornstørrelsesfordelingen er vist for tre cementer, med forskellig finhed.



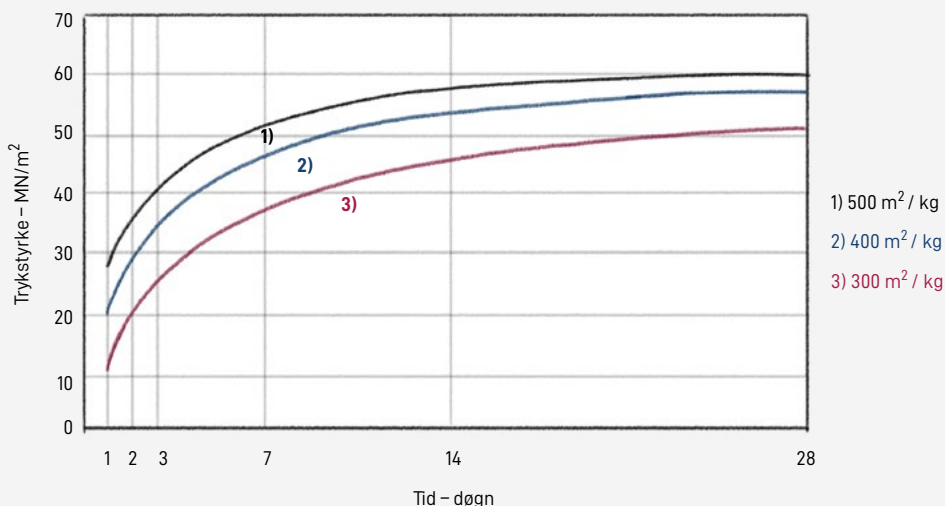
Figur 73 – Typiske kornkurver for cement [21].

Små partikler har større overfladeareal end store partikler og reagerer derfor bedre med vand. Den typiske median kornstørrelse for cement er omkring 10 - 20 µm.

– Styrkeudvikling

Cementens udvikling af egenskaber over tid afhænger af hvor stort et overfladeareal, der kan reagere med vandet i betonen. Jo større overflade der er tilgængelig, jo hurtigere forløber cementens reaktioner med vandet. En høj finhed af cementen giver derfor hurtig varme- og styrkeudvikling, mens det modsatte gælder for en lav finhed. Dette er vist på figur 74.

Cementkornenes hærdeforløb er også illustreret på figur 75. På figuren ses det hvordan vandet reagerer med cementkornene, som her er forstørret 3000 gange. Reaktionen mellem vand og cement danner såkaldte reaktionspro-



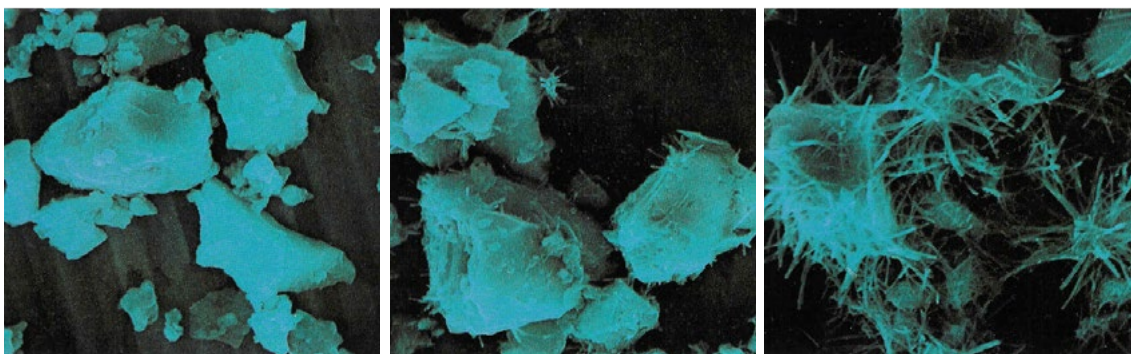
Figur 74 – Typiske kornkurver for cement [21].

dukter. Blandt disse reaktionsprodukter er det calciumsilikathydraterne, også kaldet for CSH-gelen, som bidrager til bl.a. styrkeudviklingen og tætheden i betonen. CSH-gelen er de nåleformede krystalstrukturer, som ses til højre på figuren ovenfor. Jo finere cementen er formalet, jo større overflade vil der være til stede, hvor krystalstrukturen kan udvikles på.

**Aalborg Rapid forstørret
x3000 uhydratiseret**

**Reaktion 5 min efter
tilsætning af vand**

**Reaktion 6 dage efter
tilsætning af vand**



Figur 75 – Cementkorns reaktion med vand over tid

– Alkaliforbindelser

Alkali-indholdet i cementen påvirker betonvarers udvikling af egenskaber såsom styrke og holdbarhed. Alkali-indholdet i cement stammer fra natriumoxid Na_2O og kaliumoxid K_2O . De enkelte alkaliforbindelser indflydelse på styrkeudviklingen er stadig ikke fuldt defineret. Generelt gælder det dog, at alkaliforbindelser øger den tidligere styrkeudvikling fra 1-3 døgn mens det har en reducerende effekt på de sene styrketerminer fra 3 til 28 døgn [23].

Ved angivelsen af det totale indhold af alkali-forbindelser i delmaterialer til betonbranchen anvendes oftest udtrykket Na_2O -ækvivalenter. Det totale indhold af ækvivalent Na_2O kan beregnes som følgende.

$$\% \text{ ækvivalent } \text{Na}_2\text{O} = 0,658 \cdot (\% \text{ K}_2\text{O}) + (\% \text{ Na}_2\text{O})$$

Alkali-indholdet i cementen kan reagere med betonens tilslagsmaterialer, hvis de indeholder en vis type kisel eller vandholdige silikater. Denne reaktion skaber en såkaldt alkali-kisel-gel, som ved eksponering i fugtige miljøer kan ekspandere. Ekspansionen af alkali-kisel-gelen i beton kan give anledning til revnedannelse og bør derfor undgås. Dette kan gøres ved at vælge en cement med lavt alkali-indhold samt anvende tilslagsmaterialer af passende kvalitet, se tidligere afsnit. Risikoen for at der dannes skadelig alkali-kisel-gel anses for at være mindre, hvis der anvendes en cement med et total alkali-indhold $< 0,6\%$ Na_2O -ækvivalent [21], men kan dog stadig forekomme hvis cementindholdet er højt nok og de øvrige betingelser er til stede.

Mængden af alkali-forbindelser i cementen bestemmes af råmaterialerne, som anvendes i cementproduktionen men også den anvendte produktionsmetode. Ved at anvende produktion med våd ovnslam i en semi-tør proces, vil en stor mængde af alkali-indholdet uddrives til elektrofiltrene. Cement produceret i en semi-tør proces, f.eks. de dansk producerede grå cementer, vil derfor have et meget lavt alkaliindhold. Den samme uddrivelse af alkali, vil ikke forekomme i en tør proces, og her vil det totale alkali-indhold typisk være højere. Reaktionen mellem cement og vand danner et stærkt basisk materiale. Da alkaliforbindelserne også er stærkt basiske, vil et øget indhold af alkaliforbindelser øge pH-værdien for opløsningen mellem vand og cement. Der henvises til afsnittet omkring arbejdssikkerhed for mere information omkring beskyttelsesforanstaltninger.

Tilsætningsstoffer

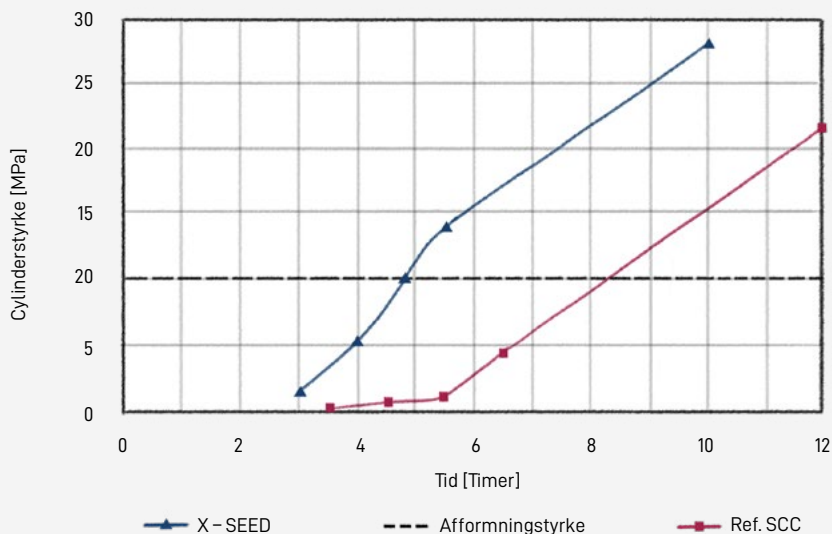
Tilsætningsstoffer eller additiver dækker over en lang række af stoffer, som ved tilsætning til betonen i enten pulver- eller væskeform bidrager gunstigt til betonens friske og/eller hærdende egenskaber. Eftersom de forskellige tilsætningsstoffer har mange forskellige formål, kan de passende deles ind i grupper, efter hvilken effekt de har på betonen. Udover tilsætningsstoffernes primære indvirkning på betonen, har hvert produkt ofte en til flere bivirkninger. Det er derfor vigtigt at producenterne er yderst opmærksomme på disse bivirkninger ved anvendelse af tilsætningsstoffer hvis de har en negativ effekt på betonens kvalitet. Tilsætningsstoffer doseres ofte i meget små mængder iht. leverandørens anvisninger. Virkningen af tilsætningsstofferne er også afhængig af en lang række parametre såsom doseringstidspunkt, cementtype, tilslagsmaterialer, finstofindhold, andre tilsætningsstoffer, v/c-forhold, konsistens, temperatur, bearbejdningsproces mm. Selv den løbende variation af de enkelte delmaterialer kan have en stor betydning for både den ønskede effekt og bivirkningerne i tilsætningsstofferne. Det er derfor yderst nødvendigt at lave indledende prøveblandinger på hver enkelt fabrik, produktionslinje, recept for at sikre at den valgte doseringsmængde passer til anvendelsen.

Der er forskel på hvilke type tilsætningsstoffer, som anvendes i en betonvareproduktion med jordfugtig beton og det der anvendes til blødstøbt beton. Det skyldes at betonernes konsistens, produktionsmetoder og anvendelse er vidt forskellige. I dette afsnit vil der være fokus på de typer af tilsætningsstoffer, som ofte anvendes i betonvareproduktionen med jordfugtig beton. Tilsætningsstofferne kan forbedre eller tilføje andre egenskaber til betonen. Nogle af de egenskaber er bl.a. plastificerende, accelererende, vandafvisende, fortykkende, tætnende og luftindblandende. Leverandørerne oplyser om doseringsgrænser, densitet, alkali- og klorid indhold, så betonproducenten lettere kan anvende produktet til at designe betonrecepten.

■ Acceleratorer

Acceleratorer dækker over den type af tilsætningsstoffer, som giver en hurtigere udvikling af betonens egenskaber. Accelerator kan både være baseret på letopløselige uorganiske salte, varme, organiske stoffer eller fysiske partikler, der fungerer som katalysator for den kemiske reaktion. I betonvareproduktionen vil det typisk være relevant at opnå en tidligere styrkeudvikling, hvorfor acceleratorer med fordel kan benyttes. Et eksem-

pel på en accelerator kunne være Master X-Seed eller MasterSet fra BASF. Nedenfor ses en figur, hvor styrkeudviklingen er vist for en SCC-beton med og uden Master X-Seed.



Figur 76 – Styrkeudvikling med og uden Master X-Seed [50]. Cement indhold, 332 kg/m³. V/C-tal på 0,43. X-Seed indhold på 3% af cementen.

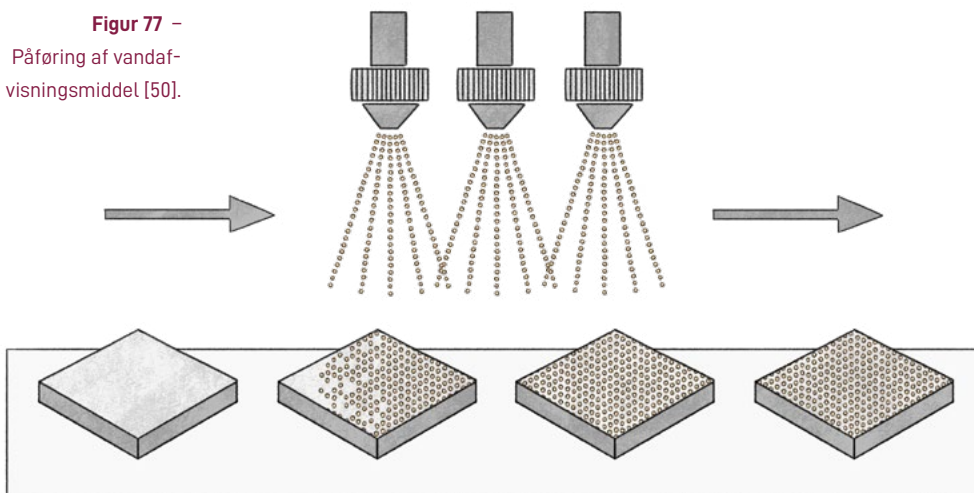
På figuren overfor ses det at ved anvendelsen af accelerator kan den nødvendige tidlige afformningsstyrke opnås 3,5 time tidligere, sammenlignet med en identisk beton uden accelerator. Samme accelererende effekt vil kunne opnås i en jordfugtig betonproduktion, hvilket kan være med til at reducere tiden i hærdekammeret.

– Vandafvisningsmiddel

Vandafvisende additiver kan give betonen en reduceret vandabsorption. Denne egenskab kan forstærke betonens evne til bl.a. at modstå frostskafer og udfældninger, samt bevare betonens farve og overfladeudtryk i længere tid. Denne type af additiver virker hydrofobere, hvilket betyder at det skyer vandet. Additivet doseres ofte under blandingen, for at få effekten igennem hele betonvareproduktet.

Som alternativ kan vandafvisningsmidlet også påføres betonen efter støbning, som vist på figuren herunder.

Figur 77 –
Påføring af vandafvisningsmiddel [50].



Vandafvisningsmidlet kan både påføres direkte efter støbning eller på hærdnede betonvarer. Her opnås den bedste effekt dog på hærdnede produkter. Vandafvisende midler baseret på f.eks. silaner, fungerer ved at der opstår en kemisk binding mellem silicium forbindelser i betonen og silaner i additivet. Denne stærke kemiske binding skaber en polymer harpiks film i kapillarporerne, som har en vandafvisende effekt. Det ses på nedenstående figur, hvordan vand på en betonoverflade opfører sig med og uden vandafvisende middel.

Figur 78 –
Jordfugtig beton med vandafvisende behandling (tv.) og uden behandling (th.) [50].



– Fortykkelsesmiddel

Der findes nogle tilsætningsstoffer, som kan gøre pastaen mere tyktflydende og derved reducere fordampningen af vand fra overfladen og øge formstabiliteten af beton [51]. Det betyder samtidig at producenten kan tillade et højere vandindhold i betonen, eller endda reducere noget af cementindholdet. Det er ikke en teknologi, som ofte er set anvendt til betonvareproduktion i Danmark. Nogle af disse additiver virker også ved at reducere afgivning af vand til overfladen også kaldes "bleeding". I dette tilfælde kan det risikeres at overfladen tørrer ud og der kan opstå plastiske svindrevner.

– Luftindblandingsmiddel

Luftindblandingsmidler fungerer ved at tilsætningsstoffet reducerer overfladespændingen i vandet, så det bliver lettere at stabilisere luftproestrukturen i betonen under blandedprocessen. I blødstøbt beton anvendes denne teknologi til at opnå en mikroporestruktur på 3-8% af det samlede betonvolumen, hvor betonens vandindhold ved frostpåvirkning kan udvide sig uden at forårsage revnedannelse. Det stabiliserede luftindhold danner nogle meget runde luftbobler, som evt. også giver en øget bearbejdelighed til betonen.

Til jordfugtig beton findes der nogle luftindblandingsmidler, som ofte er kombineret med et plastificerende middel. Disse additiver giver en finere luftporestruktur i den jordfugtige beton, dog ikke på samme måde som i blødstøbt beton. Luftporestrukturen vil stadig være grovere, hvilket skyldes blandedprocessen og betonens konsistens i den jordfugtige beton.

– Farvepigmenter

Farvepigmenter bruges til at give en anden farvenuance til betonen. Det er vigtigt at forstå at indfarvet beton ofte vil falme over tid. Det kan derfor være nødvendigt at kombinere farvet beton med f.eks. vandafvisende overfladebehandlinger, for at holde betonens farve i længere tid.

Betonfarver kan både tilsættes som granulat eller opslæmmet i væske. De bedste resultater opnås ofte ved at tilsætte et opslæmmet farvepigment til blandingen efter tilsætning af tilslagsmaterialer og inden tilsætning af cement og andre filler materialer. Ved brug af grå cement og tilslagsmaterialer i med store farveforskelle vil farven ofte have jordfarve-nyancer. Ved anvendelse af hvid cement og lyse tilslagsmaterialer, vil det indfarvede beton opnå et skarpere farve.

– Plastificerende middel

Ved optimal pakning af betonen eller ved produktion af jordfugtig beton med lav pastaindhold, kan det være svært at opnå en tilstrækkelig komprimering af betonen. Dette kan undgås ved f.eks. at øge mængden af pasta for at give betonen en bedre komprimeringsevne. Her er det vigtigt at øge både mængden af cement og vand, da en øget vandindhold alene vil føre til en svagere og mere porøs pasta. I stedet for at ændre på mængden af pasta, kan der anvendes et plastificerende additiv. Plastificerende midler har en dispergerende effekt, hvilket betyder at de fine partikler fordeler sig jævnt i betonen under blanding og støbning i stedet for at klumpe sammen. Denne effekt virker også som et kemisk smøremiddel, som gør betonen mere bearbejdelig. Det betyder at plastificeringsmidler kan reducere vandbehovet med 7-10 %, sammenlignet med beton uden plastificering.

Ved dosering af tilsætningsstoffer er det vigtigt at være opmærksom på producentens doseringsintervaller. Doseringer uden for intervallet vil enten have en ubetydelig virkning på betonen eller i værste fald virke styrkereducerende, retarderende eller øge risikoen for separation og bleeding.

Filler

Betonfiller er en betegnelse for alle de delmaterialer, som ifølge det danske tillæg til beton standarden DS/EN 206 DK NA [24], har en partikelstørrelse < 0,25mm. Betonfiller dækker altså over både inerte og reaktive delmaterialer såsom, cement, flyveaske, microsilica, kalkfiller, formalet slagge, stenmel osv. Eftersom nogle af delmaterialerne allerede er beskrevet, vil dette afsnit omhandle nogle fysiske egenskaber samt beskrive nogle af de mest anvendte fillertyper.

– Fysiske egenskaber

Filler indholdets evne til at stabilisere betonen afhænger af de sammenhængskræfter, som opstår imellem partiklerne og vandindholdet. Disse sammenhængskræfter eller kapillarkræfter er ansvarlige for formstabiliteten i den friske jordfugtige beton, der på engelsk kaldes for "green strength". Disse fysiske egenskaber er sammenlignelige med den kapillarsugeevne, som er kendt fra forskellige sedimentter. De fysiske egenskaber for sedimentter (jord) og jordfugtig beton er meget sammenlignelige, hvorfra navnet "jordfugtig" beton kommer fra.

Kapillarsugeevnen i sedimenter beskrives at være afhængig af mellemrummet mellem partiklerne, som udgør sedimentets poresystem. Ifølge [37] og [38] findes der en tydelig sammenhæng mellem kapillarsugeevnen og partiklernes korndiameter. Dette kan illustreres på figuren herunder, hvor rørerenes varierende radius viser indvirkningen på kapillarsugeevnen udtrykt ved den kapillære stighøjde.



Figur 79 –
Illustration af kapillarsugeevnen ved varierende poreradius, gående fra stor til lille radius fra vestre mod højre

Figuren ovenfor viser, at jo finere poresystemet er, jo kraftigere er sugedybden. Nogle typiske værdier for kapillarsugeevnen i forskellige sedimenter er også vist i tabellen på figur 80.

Det bemærkes her at kapillarsugeevnen er høj for sedimenter med små partikelstørrelser såsom silt og omvendt er den lav for grusfraktioner med store partikelstørrelser. Størrelsen af kapillarporernes radius antages nemlig af at kunne beregnes som $0,2 \cdot d$ [38], hvor d er kornstørrelsesdiametere.

Det ses altså at små partikler øger kapillarsugeevnen, da de små partikler danner et finere poresystem. For jordfugtig beton betyder det, at sammenhængskraften og dermed formstabiliteten øges ved et højere indhold af finstof. Forsøg med jordfugtig beton viser også at en pasta med højere v/c -forhold i betonen giver anledning til napning, se afsnittet om "vand/cement forholdet". Ved at øge mængden af fillermaterialer øges mængden af små partikler pr. m^3 jordfugtig beton og dermed øges kapillarkræfterne og formstabiliteten. Filler indholdet er derfor med til at styre formstabiliteten pga. de fysiske egenskaber.

Sediment	Korndiameter (mm)	Kapillar stighøjde (cm)
Fin silt	0,008	750
Grov silt	0,025	300
Meget fint sand	0,075	100
Fint sand	0,15	50
Mellemfint sand	0,3	25
Groft sand	0,5	15
Meget groft sand	2	4
Fin grus	5	1,5

Figur 80 – Kapillær stighøjde i sedimenter, (Fetter 1994) [38].

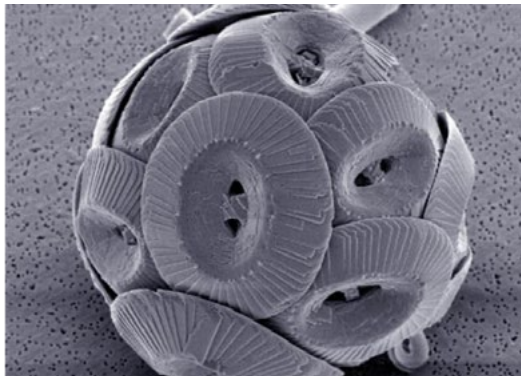
Vandbehovet i beton siger noget om hvor meget vand/cementpasta der skal til, for at opnå en bestemt konsistens eller komprimeringsevne. Jo mindre pasta, der er til at fylde hulrummet mellem tilslaget, jo dårligere bliver komprimeringsevnen af den friske beton. Som vist i afsnittet " Pakningsoptimering - Samlet kornkurve", opnås den bedste pakning, ved en kornkurve med størst indhold af de grove partikler, og successivt mindre og mindre indhold af de finere partikler.

De fleste naturlige sandforekomster, vil have forholdsvis "for meget" finstof, ud fra et pakningsmæssigt synspunkt, og derfor ses det ofte, at et øget filler indhold forringer pakningen og dermed øger vandbehovet i en jordfugtig beton [39]. Hvis finstofindholdet giver anledning til for store overfladekræfter, kan der introduceres et plastificerende middel i recepten, for at kompensere for et øget vandbehov.

Mængden af filler indhold påvirker også den jordfugtige betons evne til at absorbere variationer i vandindholdet. Jo større mængde af filler, der anvendes i en jordfugtig beton, jo større variationer i vandindhold kan betonen optage uden at ændre bearbejdelighed eller vandmætningsstadiet til f.eks. tør eller våd [39].

– Kalkfiller

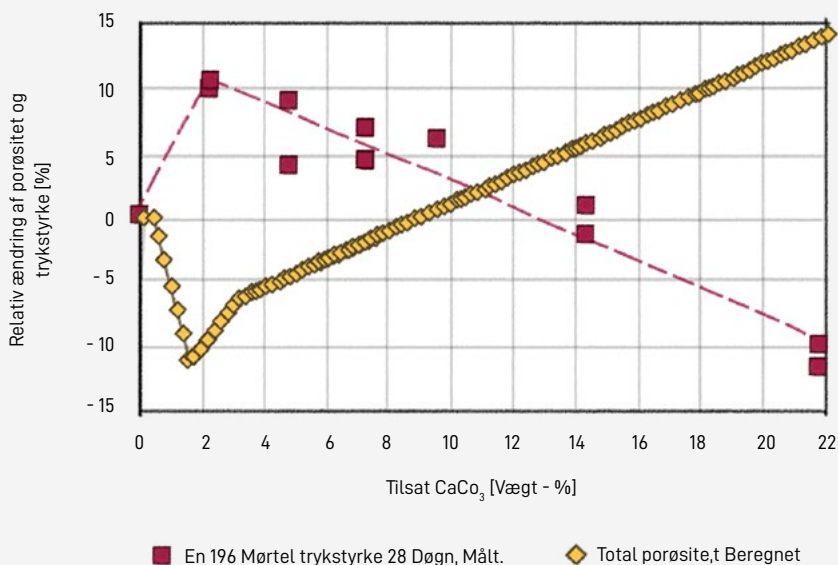
Kalkfiller kommer fra kridt, der hovedsageligt består af calciumkarbonat, CaCO_3 . Kridt er dannet ved sedimentering af skallerne fra alger og skaldyr gennem mange millioner af år. Den danske undergrund er fyldt af kridt, og derfor findes der en lang række kridtgrave i Danmark, hvor materialet udvindes og anvendes til en lang række industrier. I betonindustrien anvendes en fin formaling af kridt, som populært kaldes for kalkfiller.



Figur 81 – Samling af kokkolitter fra alger i kridttiden, som kan ses ved forstørrelsen af kridt gennem et elektronmikroskop.

Kalkfiller betegnes som en inert filler. Kalkfilleren bidrager altså ikke til cementreaktionerne og derfor indgår det heller ikke i beregningen af v/c-forholdet. Undersøgelser viser dog, at kalkfilleren har en nukleationseffekt på de tidlige cementreaktioner, hvilket bidrager til en øget tidlig styrkeudvikling. Derudover kan en lille andel af kalkfilleren reagere med cementens aluminat-faser, C_3A , hvilket yderligere bidrager til betonens styrke. Et eksempel på dette kan ses på figur 82.

På figuren ses det at kalkfillerens effekt på trykstyrken varierer alt efter doseringsmængden. Det ses at styrketilvæksten er størst ved dosering af 2 vægt-% kalkfiller. Ved at tilsætte kalkfiller i en mængde op til 10 vægt-% til cementen, ses nogen eller ingen styrketilvækst [40]. Det skal dog understreges at denne teknologi oftest er indarbejdet i cementproduktet, da de bedste resultater opnås ved formaling af kalkfiller og cement på samme tid. Muligheden for at udnytte denne teknologi kræver derfor et kendskab til kalkfillerindholdet i den aktuelle cementtype og styrketilvæksten vil ofte udlignes af andre variationer.



Figur 82 – Effekten på 28 døgn cement (EN 196 mørtel) styrke med tilsætning af fint kalkfiller (1100 m²/kg) til cement (400 m²/kg) [40].

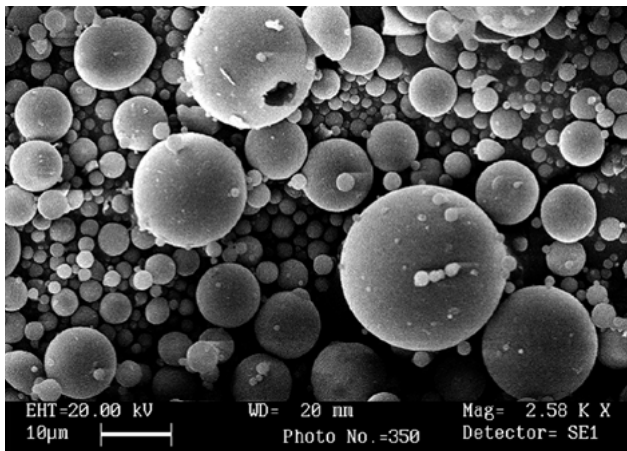
Sammensættes en beton med en kombination af cement og kalkfiller med samme styrkeniveau som en referencebeton uden kalkfiller, vil der ikke være nogen betydelig ændring i holdbarhed over tid ift. De fleste nedbrydningsmekanismer. Kalkfiller indholdet kan dog øge risikoen for skadelige thaumasit reaktioner, hvis betonen eksponeres for sulfatangreb kombineret med lave temperaturer og vandpåvirkninger [41].

■ Flyveaske

Flyveaske er et affaldsprodukt, som fremkommer ved forbrænding af fint formalet kul ved produktion af el på kraftværkerne. Materialet opsamles i produktionens elektrostatiske filtre, hvor det udskilles fra røggasserne. Flyveaske er formet som kuglerunde partikler, der typisk har samme kornstørrelse som cementpartikler, se figur 83.

Den kemiske sammensætning af flyveaske er bl.a. silicium SiO₂, aluminium AlO₃ og jern Fe₂O₃, der tilsammen skal udgøre min. 70 % af materialet for at kunne anvendes til beton. Denne sammensætning afhænger af forbrændingsteknikken og kul kvaliteten.

Den kemiske sammensætning af flyveaske er bl.a. silicium SiO_2 , aluminium AlO_3 og jern Fe_2O_3 , der tilsammen skal udgøre min. 70 % af materialet for at kunne anvendes til beton. Denne sammensætning afhænger af forbrændingsteknikken og kul kvaliteten.



Figur 83 –
Forstørrelse af
flyveaske partikler.

Flyveasken er en reaktiv filler, men kan ikke ligesom cementen reagere alene med vand. Flyveaskens indhold af SiO_2 reagerer kemisk med den overskydende calciumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$ fra cementens reaktion med vand. Herved dannes en større mængde C-S-H-gel, som bl.a. bidrager til den sene styrkeudvikling i betonen. Materialer som reagerer med cementens hydratiseringsprodukter kaldes for puzzolaner. Flyveaske kan altså betegnes som en puzzolan, og asken har vist sig at bidrage til en lang række positive egenskaber i betonen såsom styrkeudvikling, øget tæthed, sulfatbestandighed, bestandighed overfor alkaliske reaktioner [21].

Flyveasken udnyttes også forskelligt til hhv. jordfugtige betonvarer og blødstøbt konstruktionsbeton pga. de forskellige produktionsmetoder og betonernes sammensætning.

Til blødstøbt konstruktionsbeton er der bl.a. fokus på at flyveasken bidrager til den sene styrkeudvikling. Styrkebidraget fra flyveaske, stammer fra den øgede mængde af C-S-H-gel, som dannes pga. flyveaskens puzzolanitet. Flyveaske kan dog ikke bidrage med samme styrke tilvækst, som cement. Derfor anvendes en såkaldt aktivitetsfaktor, som er et udtryk for hvor meget

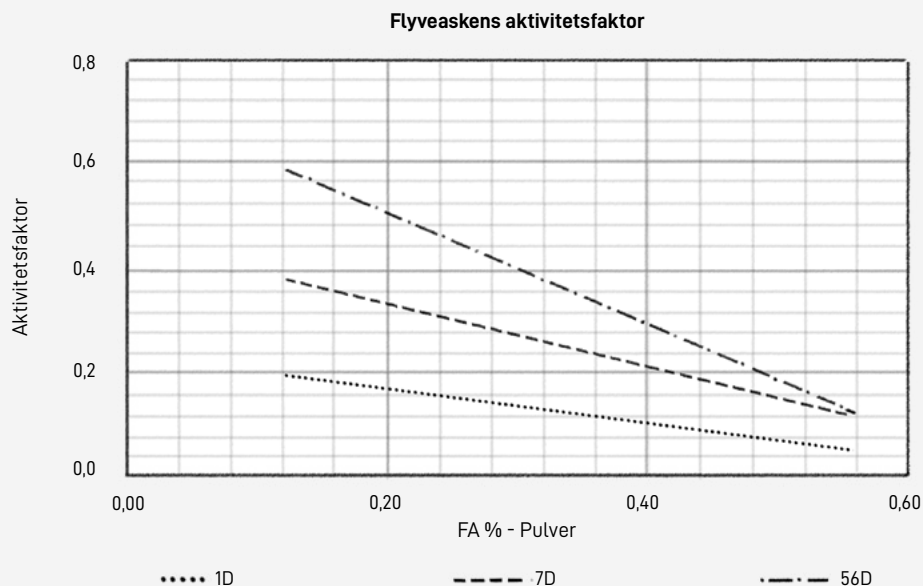
en bestemt mængde flyveaske bidrager til styrkeudviklingen, sammenlignet med en ækvivalent mængde cement. Denne faktor kan anvendes til at beregne v/c-forholdet, som benyttes i Bolomeys formel, for at give et estimat af trykstyrkeniveauet, se afsnittet omkring "vand/cement-forhold". I figuren nedenfor er det vist hvordan denne formel kan udvides, for at tage højde for forskellige puzzolaner heriblandt flyveaskens indvirkning på v/c-forholdet og dermed styrkeudviklingen.

Parameterbeskrivelse	Beregning/Værdi
Betonstyrken	$f_c = k \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{(C + k \cdot P)}} - a \right)$
Styrkefaktor	K, afhænger af termin, cement og tilslag
Vand- og Cementindhold	V og C, er massen af vand og cement i [kg/m ³]
Aktivitetsfaktor	k, afhænger af bl.a. puzzolantype, termin og cement.
Puzzolan indhold	P, er massen af puzzolan i [kg/m ³]
Styrkefaktor	α , afhænger af termin og cement

Figur 84 – Bolomeys formel for beton med indhold af cement og puzzolaner uden luftindblanding [21].

For blødstøbt beton i Danmark anvendes typisk en aktivitetsfaktor for flyveaske på $k = 0,5$ når v/c-forholdet beregnes. Denne værdi tager højde for en kombination af den sene udvikling af styrke- og holdbarhedsegenskaber.

På nedenstående figur, er aktivitetsfaktoren for flyveaske beregnet via Bolomeys formel ud fra målte trykstyrker i blødstøbte betoner, hvor mængden af flyveaske er varieret op til 60 %-pulverindholdet. Undersøgelser af blødstøbte flyveaskebetoner viser også at flyveasken først bidrager betydeligt til styrkeudviklingen på de sene terminer efter 56 døgn. Det ses også at aktivitetsfaktoren er afhængig af den tilsatte mængde sammenlignet med cementindholdet. Jo større mængde af flyveaske ift. mængden af cement, jo mindre effekt har flyveasken, hvilket begrænser tilsætningen af flyveaske.



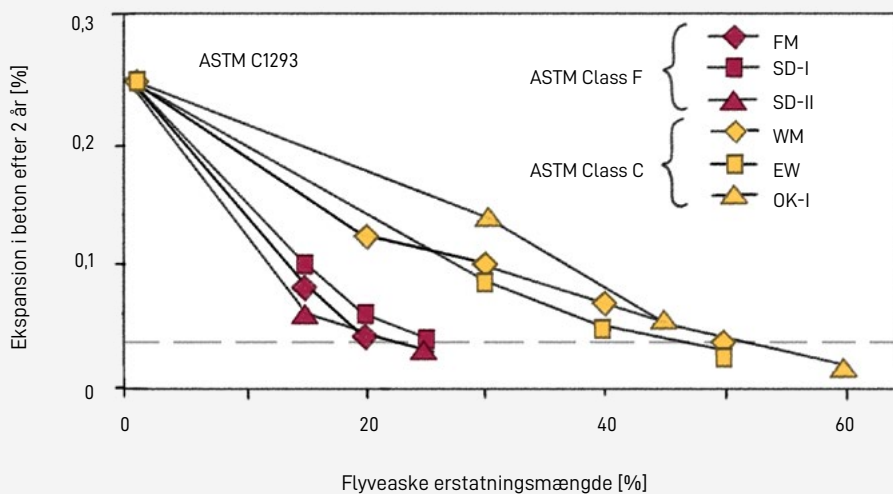
Figur 85 – Beregnet k-faktor for betoner med flyveaske tilsætning [42].

Figuren viser den beregnede aktivitetsfaktor, som funktion af det varierende flyveaskeindhold for en række blødstøbte betoner med cementindhold på hhv. 360 kg/m^3 , 270 kg/m^3 , 190 kg/m^3 og 120 kg/m^3 . For hver af de 4 betonrecepter med forskelligt cementindhold, er flyveaskeindholdet varieret med hhv. 50 kg/m^3 , 100 kg/m^3 , og 150 kg/m^3 . Flyveasken har altså den største effekt på blødstøbte betoner på de sene terminer og ved lave doseringer.

For jordfugtig beton til betonvarer udnyttes flyveasken anderledes. Her er der fokus på at flyveaskens kugleformede partikler, bidrager til en bedre komprimerbarhed. Betonvareproducenterne kan altså få et højere niveau på 1 og 7 døgns styrke, fordi betonen kan komprimeres yderligere ved tilsætning af flyveaske. Flyveaskens bidrag til styrkeudviklingen i pastaen målt ved en aktivitetsfaktor, har derfor en anden betydning for jordfugtig beton, da komprimerbarheden af betonen har større indflydelse på betonens styrkeniveau. Cementen kan derfor ofte erstattes 1:1 med flyveaske ved lave doseringer $< 20 \%$ af pulvermængden, uden at det har en indflydelse på måling af 1 og 7 døgns styrken. Aktivitetsfaktoren som anvendes i blødstøbt beton kan altså ikke direkte anvendes i jordfugtig beton. Den giver dog et godt billede af hvordan flyveasken reagerer over tid.

Det er dog vigtigt at understrege at selvom flyveasken ikke har stor betydning for styrkeudviklingen i pastaen på de tidligere terminer ved 1 og 7 døgn, så har det stor betydning for langtidsholdbarheden. Produceres f.eks. to betonvarerecepter med samme 1 og 7 døgns styrke, en med flyveaske og en uden flyveaske, vil betonvarerecepten med flyveaske opnå en bedre pakning da flyveasken har en rundere partikelform. Tætheden af betonen øges også ved anvendelse af flyveaske, eftersom den øgede mængde af C-S-H-gel skaber en tættere pasta. Betonen kan derved modvirke absorptionen af vand, som er en af kilderne til bl.a. alkalikiselreaktioner og frostsprængninger.

Risikoen for skadelige alkali-kisel-reaktioner reduceres bl.a. fordi flyveaskeindholdet binder en mængde af det alkali-indhold, som betonen måtte indeholde [43]. Dette er med til at reducere ekspansionen, som opstår når alkali-kisel-gel absorberer vand, se afsnittet omkring "reaktiv kisel". På figuren nedenfor ses resultaterne af en række forsøg, hvor potentialet for skadelige alkali-kisel-reaktioner er udtrykt ved ekspansionen af betonemner lagret i 2 år.



Figur 86 – Flyveasketydens og -tilsætningsmængdens betydning for ekspansion af beton (grove, reaktive, kiselholdige, kalkstens til-slag) [43].

Ud fra figuren ovenfor kan det ses at de skadelige ekspansioner reduceres ved større tilsætninger af flyveaske. I produktionen af jordfugtig beton til betonvarer, er der ikke direkte krav til at anvende tilslag uden reaktivt-kisel eller cementer med lavt alkaliindhold. Flyveaske kan derfor være et vigtigt filler materiale i betonvarer, hvis det ønskes at reducere de skadelige ekspansioner ved brug af f.eks. reaktivt sand.



Figur 87 – Flise produceret med hhv. tilslag med porøs flint (tv.) og tilslag uden porøs flint (tv.). Det ses hvordan betonen med dårligt tilslag (tv.) er skadet af alkali-kisel-reaktioner.

Eftersom flyveaske produceres på kulkraftværker, vil der i forbindelse med den globale politiske strategi om at reducere mængden af energi produceret på kul, blive mangel på flyveasken i fremtiden. Derfor oplever flere betonproducenter at tilgængeligheden af produktet reduceres. Fordi betonvareproducenterne har færre krav til delmaterialerne i den jordfugtige beton, er det i flere tilfælde muligt at anvende andre typer af askeprodukter såsom bundaske, der ikke kan anvendes til andre formål. Disse askeprodukter vil ofte være forbundet med større doseringsmængder for at opnå samme resultat, eller begrænsninger som følge af en kemisk sammensætning, som påvirker betonen negativt. Anvendelse af disse produkter kræver derfor en eftervisning af de ønskede egenskaber.

– Mikrosilica

Mikrosilica er et biprodukt fra produktionen af bl.a. siliciummetaller og ferrosilicium på elektriske smelteovne. Mikrosilica er et meget fint pulver, som har en største partikelstørrelse på ca. 1µm. Det er ca. 100x mindre end typiske cementpartikler, hvilket gør det muligt at opnå meget tæt pakning af

betonen. Partiklerne har også relativt stor overflade på omkring 15 - 25.000 m²/kg, hvilket bidrager til en øget nukleationseffekt med betydning for cementens styrkeudvikling. Derudover er mikrosilica puzzolaneegenskaber og reagerer med cementens hydratiseringsprodukter. Kombinationen af disse parametre gør mikrosilica til en yderst effektiv filler, som ved lave doseringer på 8-10% af cementindholdet kan give væsentlige styrkeforøgelser. Sammenlignet med flyveasken, så er effektivitetsfaktoren for mikrosilica ca. 3 - 4. I jordfugtige betoner kan der også forventes en øget pakning, som resulterer i en øget tæthed af betonen. Dette vil ligesom for blødstøbt beton give højere styrker og øget tæthed af betonen. Den forøgede tæthed giver samtidig en væsentlig reduktion af vandabsorptionen, som derved øger frostbestandigheden og reducerer risikoen for alkali-kisel-reaktioner.

Proportionering af betonrecept

Ved proportionering af betonvarerecepter er det vigtigt at have fokus på betonens anvendelse. Den eksponering, som betonen udsættes for, har nemlig betydning for hvilke delmaterialer og blandingsforhold der kan anvendes. Når producenten har valgt de materialer, som kan bidrage med de ønskede egenskaber, kan en teoretisk betonrecept sammensættes. Denne recept medtager enkelte overvejelser omkring betonens ønskede egenskaber.

Der er flere måder at proportionere en beton på. Ved sammensætning af en beton til bærende konstruktioner, vil betonproducenten ofte starte med at sammensætte kitmassen, som består af pasta og luftindholdet. Herefter udvælges en passende tilslags sammensætning ud fra de kriterier, som er givet i standarderne og fra rådgiver. Samme metode kan også anvendes for betonvareproducenter, men da tilslagsvolumen ofte udgør en større volumenandel i de jordfugtige betoner, kan betonen med fordel designes med udgangspunkt i tilslags sammensætning. Herefter sammensættes kitmassen, og andel af denne vælges således at den ca. svarer til hulrummet mellem tilslagsmaterialerne. En gennemgang af denne teoretiske proportionering er vist i de følgende afsnit med udgangspunkt i at imødekomme krav til specifikke betonegenskaber.

Eksempel 1 – Tilslagsmateriale sammensætning

Det ønskes at sammensætte en beton, med fokus på at optimere styrken af betonen ved at sammensætte et velgraderet tilslagsskelet.

Fra tidligere afsnit ses det at styrken af jordfugtige betoner kan øges ved at opnå den bedste pakning af betonens delmaterialer. Derfor vælges den sammensætning af tilslagsmaterialerne sand og sten, som giver den bedste egenpakning. Det er samtidig et ønske at designe en beton, som også har et ensartet overfladeudseende. Betonproducenten har følgende tilslagsmaterialer til rådighed.

- Sand 0/2, kl. E, (densitet = 2610 kg/m³)
- Sten 4/8, kl. A, (densitet = 2660 kg/m³)

I afsnittet omkring tilslagsmaterialer ses det, at den optimale pakning for disse to typer tilslag vurderes til en 35/65 massefordeling mellem sand/sten. Der vælges dog en sand/sten sammensætning på 40/60, for at opnå en mere ensartet overflade på det endelige produkt.

Ved hjælp af metoden til bestemmelse af pakningsgraden beskrevet i [29], findes pakningsgraden til 0,73 for denne materialekombination. Alternativt kunne egenpakning være fundet vha. IT-Værktøjer.

Det betyder altså at det samlede faststofvolumen af tilslag udgør 73% af det totale betonvolumen og de resterende 27% er hulrum. Derved kan indholdet af sand og sten findes som følgende.

Parameterbeskrivelse	Beregning/Værdi
Volumen, samlet tilslag	$V_t = (\text{egenpakning af tilslag}) \cdot 1000L$
Volumen, sand, VOT	$V_{\text{sand}} = V_t \cdot \%_{\text{sand}}$
Volumen, sten, VOT	$V_{\text{sten}} = V_t \cdot \%_{\text{sten}}$
Masse, sand, VOT	$m_{\text{sand}} = \frac{\rho_{\text{sand}}}{1000} \cdot V_{\text{sand}}$
Masse, sten, VOT	$m_{\text{sten}} = \frac{\rho_{\text{sten}}}{1000} \cdot V_{\text{sten}}$

Beregning

$$\text{Volumen, sand, VOT} \quad V_{\text{sand}} = 730 \text{ liter} \cdot 0,40 = 292 \text{ liter}$$

$$\text{Volumen, sten, VOT} \quad V_{\text{sten}} = 730 \text{ liter} \cdot 0,60 = 438 \text{ liter}$$

$$\text{Masse, sand, VOT} \quad m_{\text{sand}} = \frac{2610 \text{ kg/m}^3}{1000} \cdot 292 \text{ liter} = 762 \text{ kg}$$

$$\text{Masse, sten, VOT} \quad m_{\text{sten}} = \frac{2660 \text{ kg/m}^3}{1000} \cdot 438 \text{ liter} = 1165 \text{ kg}$$

Dette indsættes i betonrecepten, som herved fungerer som en oversigt over de beregninger, som er foretaget.

Volumen (V) af sand og sten, beregnes ud fra densiteten (ρ) og massen (m) som følgende.

$$V = m / \rho \cdot 1000 \text{ l} / \text{m}^3$$

Proportionering af tilslag

Delmateriale	Densitet	Masse	Volumen
	Kg/m ³	Kg/m ³	Liter
Sand 0/2, kl. E	2610	762	292
Sten 4/8, kl. A	2660	1165	438
Total masse		1927	
Total volumen			730

Eksempel 2 – Pastavolumen

Det næste skridt i proportioneringen er at få fastlagt kitmassens volumen, som består af pasta og luftindhold. Formålet med kitmassen er opnå en styrkeudvikling i betonen, samt øge betonens komprimeringsevne. Kitmassevolumen vælges så betonen opnår en jordfugtig konsistens uden at blive

for tør eller for våd. Både praktisk erfaring og enkelte forsøg har vist at en tilnærmet optimal pakning fås ved at kitmassen svarer til hulrummet + 4% pastaoverskud. Når der er tale om pastaoverskud, betyder det at pasta-volumen bliver større end hulrummet mellem tilslagspartiklerne. Herved skubbes tilslagspartiklerne fra hinanden og bearbejdigheden øges. Det betyder også at den normerede recept får et mindre tilslagsvolumen end beregnet tidligere, og derfor korrigeres tilslagsvolumen i recepten.

Ud fra tilslagets pakningsgrad findes hulrummet til 27% svarende til 270 liter/m³. For at have 4% pastaoverskud skal mængden af pasta øges med 4% svarende til 40 liter/m³. Det samlede kitmasse volumen er altså 310 liter/m³.

Tilslagsvolumenerne skal nu reduceres tilsvarende til det øgede kitmasse-volumen.

Parameterbeskrivelse	Beregning/Værdi
Pastaoverskud	$\%_{po} = 4\%$
Volumen, kitmasse	$V_k = V_{hulrum} + 1000L \cdot \%_{po}$
Volumen, tilslag, korrigeret	$V_{t,1} = V_t - 1000L \cdot \%_{po}$
Masse, samlet tilslag, VOT, korrigeret	$m_{t,1} = m_t \cdot \frac{V_{t,1}}{V_t}$
Masse, sand, VOT, korrigeret	$m_{sand,1} = m_{sand} \cdot \frac{V_{t,1}}{V_t}$
Masse, sten, VOT, korrigeret	$m_{sten,1} = m_{sten} \cdot \frac{V_{t,1}}{V_t}$

Beregning

Volumen, kitmasse $V_k = 270L + 40L = 310L$

Volumen, tilslag, korrigeret $V_{(t,1)} = 730L - 40L = 690L$

Masse, sand, VOT, korrigeret $m_{sand,1} = 762kg \cdot \frac{690 \text{ liter}}{730\text{liter}} = 720kg$

Masse, sand, VOT, korrigeret $m_{sten,1} = 1165kg \cdot \frac{690 \text{ liter}}{730\text{liter}} = 1101kg$

Herved bliver den normerede recept som følgende.

Korrigeret volumen af kitmasse og tilslag

Delmateriale	Densitet	Masse	Volumen
	Kg/m ³	Kg/m ³	Liter
Sand 0/2, kl. E	2610	720	276
Sten 4/8, kl. A	2660	1101	414
Klitmasse			310
Total volumen			1000

■ Eksempel 3 – Kitmassens sammensætning

For at finde den normerede mængde af cement og vand i recepten, undersøges sammensætningen af kitmassen. Kitmassens volumen er ud fra optimale komprimeringsegenskaber i betonen valgt til 310 liter/m³.

Sammensætningen af kitmassens volumen består af pasta porøsitet, vand, cement, additiver og fillermaterialer. Det samlede luftindhold fra bl.a. makroporøsitet antages at være 7,5% af det samlede betonvolumen, svarende til 75 liter/m³.

Denne recept laves som en ren cement recept, og mængden af cement og vand skal altså tilsammen give et volumen svarende til 310 liter/m³ - 75 liter/m³ = 235 liter/m³.

Kitmassens vandindhold vælges ud fra betragtningerne vand/pulver forhold i tidligere afsnit omkring vandindhold. Som beskrevet i tidligere afsnit, kan et godt overfladeudseende samt gode komprimeringsegenskaber opnås ved et forhold mellem vand og pulver (v/p) på ca. 0,38. Eftersom denne beton kun indeholder cement som pulver, er $v/p = v/c$.

Derfor sættes v/c-forholdet til 0,38. I dette eksempel anvendes:

- BASIS Cement $(\rho_c = 3080 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})$
- Vand $(\rho_w = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})$

Ud fra disse oplysninger kan mængderne af delmaterialer i kitmassen beregnes i figuren herunder

Parameterbeskrivelse	Beregning/Værdi
Volumen, kitmasse	$V_k = V_l + V_c + V_w$
Volumen, luft	$V_l = 75\text{L}$
Volumen, cement	$V_c = \frac{m_c}{\rho_c}$
Volumen, vand	$V_v = \frac{m_w}{\rho_w}$
Vand/Cement-forhold	$v/c = \frac{m_w}{m_c}$
Masse, cement	$m_c = \frac{(v_k - v_l)}{\left(\frac{1}{\rho_c} + \frac{v/c}{\rho_v}\right) \cdot 1000 \frac{\text{L}}{\text{m}^3}}$
Masse, Vand	$m_w = v / c \cdot m_c$

Beregning

$$m_c = \frac{(310L - 75L)}{\left(\frac{1}{3080 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} + \frac{0,38}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \right) \cdot 1000 \frac{\text{L}}{\text{m}^3}} = 333\text{kg}$$

$$m_w = 0,38 \cdot 333\text{kg} = 127\text{kg}$$

Dette kan herefter indsættes i figuren nedenfor, hvor indholdet af kitmassen kan ses.

Proportionering af kitmasse

Delmateriale	Densitet	Masse	Volumen
	Kg/m ³	Kg/m ³	Liter
BASIS Cement	3080	333	108
Vand	1000	127	127
Luftindhold (7,5 %)	–	–	75
Total masse		460	
Total volumen			310

– Eksempel 4 – Normeret betonrecept

Herefter kombineres tilslagsmaterialerne og kitmassen i en samlet oversigt, som herefter fungerer som den normerede betonrecept. Det er vigtigt at sikre at det totale volumen svarer til 1000 liter eller 1m³. Betonrecepten kan ses i figuren på højre side.

Herved fremkommer den teoretiske betonrecept, som et resultat af den foreløbige proportionering. Det skal nævnes at hver produktion har forskellige produktionsapparater og tilhørende variationer i delmaterialer. Derfor skal mængderne afstemmes så de svarer til den ønskede satsstørrelse. Samtidig vil fugtindholdet i tilslagsmaterialerne også variere under produktionsprocessen afhængigt af vejr- og lagringsforhold. Derfor skal vandindholdet korrigeres for den såkaldte frie fugt.

Delmateriale	Densitet	Masse	Volumen
	Kg/m ³	Kg/m ³	Liter
Sand 0/2, kl. E	2610	720	276
Sten 4/8, kl. A	2660	1101	414
BASIS Cement	3080	333	108
Vand	1000	127	127
Luftindhold (7,5 %)	–	–	75
Total masse		2282	
Total volumen			1000

– Eksempel 5 – Blandesats og korrigeret vandindhold

En betonvareproducent har en produktionslinje, som bruger 120 liter beton til en fyldt form og støbeprocessen tager 30 sekunder. Blandersystemet tager 3 minutter om at blande en sats inkl. transport til blokstensmaskinen. Det ønskes derfor at lave en blandesats, som netop er nok til at holde maskinen kørende. Det ses umiddelbart at blokstensmaskinen når at køre 6 maskin-cykler på de 3 minutter det tager at lave en ny blanding.

Størrelsen af hver blandesats bør derfor være:

$$6 \times 120 \text{ liter} = 720 \text{ liter} = 0,72\text{m}^3.$$

Vandindholdet varierer løbende i tilslagsmaterialerne, og det er derfor vigtigt at korrigere recepten, for den mængde frit vand, som tilslagsmaterialerne tilfører til betonen. Tilslagsmaterialerne i den normerede betonrecept er beregnet ud fra antagelsen om at der er tale om massen i VOT-tilstand. Når tilslagene afviger fra VOT-tilstand, vil massen af det frie vand eller det manglende vand bevirke at der afvejes og doseres hhv. for lidt eller for mange tilslagsmaterialer. Nedenfor ses et eksempel på tilslagsmaterialer med forskellige fugtindhold og hvordan dette korrigeres.

Parameterbeskrivelse	Beregning/Værdi
Vandindhold, Sand (målt)	$w_{\text{sand}} = 4\%$
Absorption, Sand (oplyst)	$w_{\text{a,sand}} = 0,2\%$
Vandindhold, Sten (målt)	$w_{\text{sten}} = 0,5\%$
Absorption, Sten (oplyst)	$w_{\text{a,sten}} = 0,8\%$
Masse, tilslag, fugt korrigeret	$m_{(t,korr)} = m_{(t,1)} \cdot \frac{\left(1 + \frac{w_t}{100}\right)}{\left(1 + \frac{w_{a,t}}{100}\right)}$
Masse, vand, ønsket	m_w
	$m_{w,t} = m_{t,korr} \cdot (w_t - w_{a,t})$
Masse, vand, korrigeret	$m_{w,korr} = m_w - m_{w,t}$
Beregning	
Masse, sand, fugt korrigeret	$m_{\text{sand,korr}} = 720\text{kg} \cdot \frac{\left(1 + \frac{4}{100}\right)}{\left(1 + \frac{0,2}{100}\right)} = 748\text{kg}$
Masse, sand, fugt korrigeret	$m_{\text{sten,korr}} = 1101\text{kg} \cdot \frac{\left(1 + \frac{0,5}{100}\right)}{\left(1 + \frac{0,8}{100}\right)} = 1098\text{kg}$
Frit vand, sand	$m_{w,\text{sand}} = 748\text{kg} \cdot (4\% - 0,2\%) = 28,4\text{kg}$
Frit vand, sten	$m_{w,\text{sten}} = 1101\text{kg} \cdot (0,5\% - 0,8\%) = -3,3\text{kg}$
Masse, vand, korrigeret	$m_{w,korr} = 127\text{kg} - (28,4\text{kg} - 3,3\text{kg}) = 102\text{kg}$

Det korrigerede vandindhold skal anvendes, når mængderne til den ønskede blandesats skal beregnes.

De ønskede mængder findes ved at kende den normerede betonrecept og gange delmaterialerne med størrelsen på den ønskede blandesats.

Beregnete mængder, blandesats

Satsstørrelse: 0,72m³			
Delmateriale	Densitet	Masse pr. m ³	Beregnet masse
	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/sats
Sand 0/2, kl. E *(korrigeret)	2610	748	538,3
Sten 4/8, kl. A *(korrigeret)	2660	1098	790,5
BASIS Cement	3080	333	240,1
Vand *(korrigeret)	1000	102	73,2
Luftindhold (7,5 %)	–	–	–

Justering af recept

Når betonproducenten har udarbejdet en recept som overholder ønsker til egenskaber samt eventuelle normmæssige krav, kan det være nødvendigt at foretage løbende justeringer af recepten, for at tilpasse variationerne i delmaterialerne. Produktstandarderne foreskriver at enhver ændring i delmaterialer, som forårsager væsentlige ændringer af egenskaber i det færdige produkt skal udløse en gentagelse af den indledende typeprøvning. Standarderne giver et par eksempler på væsentlige ændringer, mens der i BVK Manualen er givet nogle mere konkrete beskrivelser af hvad der definerer væsentlige ændringer. Det er vigtigt at medarbejdere som er en del af betonvareproduktionen ved anvendelse af jordfugtig beton, har et kendskab til hvor meget en recept må justeres. Derfor er der i det følgende afsnit en gennemgang af disse grænser.

– Skift af delmaterialer eller leverandør

Delmaterialer eller leverandører må ikke skiftes i den daglige produktion uden at typeprøvning for betonvareproduktet gentages. Dette bundes i at

delmaterialer kan have de samme produktnavne, som ofte kan være med til at overbevise om at produkterne har de samme egenskaber. I virkeligheden er der måske tale om to helt forskellige produkter, som ved et 1:1 skift, har stor betydning på betonegenskaberne.

Cement er et godt eksempel på dette. Hver leverandør har typisk et produkt af typen "CEM I 52.5". Under afsnittet omkring cement, ses en lang række egenskaber, som kan variere iblandt de forskellige produkter. En type af "CEM I 52.5" kan have højt alkali-indhold, som kan øge risikoen for alkali-kisel-reaktioner. En anden "CEM I 52.5" kan have lavere tidlig styrkeudvikling, og kræver derfor mere cement for at opnå de tidlige styrker mellem 1 og 7 hærdedøgn. Hvis der sker en ændring af cementens handelsbetegnelse eller cementidentifikation iht. DS/INF 135 skal der også udføres en ny typeprøvning.

Af disse grunde betegnes skift mellem delmaterialer som en væsentlig ændring, og er derfor ikke en justeringsmulighed i den daglige produktion. Skift af delmaterialer skal i stedet foretages igennem oprettelse af en ny grundrecept og efterfølgende typeprøvning.

■ Skift af tilslagsleverandør

Det er muligt at skifte mellem leverandører af tilslagsmaterialer i den daglige produktion

Denne undtagelse gælder så længe varedeklarationer og prøvningsresultater viser identiske egenskaber mellem det gamle og det nye materiale. Her er det bl.a. vigtigt at kornkurve, oprindelse mm. er identiske, eftersom det ellers kan have en stor betydning for både de friske- såvel som de hærdnede betonegenskaber.

■ Tilsætningsstoffer

Doseringen af tilsætningsstoffer må justeres med op til 10% iht. grundrecepten.

Anvendes der f.eks. 1,00 kg plastificeringsmiddel pr. m³ i grundrecepten, må der i den daglige produktion ændres på denne dosering i intervallet 0,90 kg - 1,10 kg pr. m³ beton. Dette giver mulighed for at have en mere fleksibel produktion.

– Vandindhold

Der er ikke nogen begrænsning på justering af vandindholdet. Som nævnt tidligere er justeringsbåndet for vand så smalt grundet behovet for formstabilitet og komprimeringsevne. Skulle vandmængden justeres så meget at det ville have betydning for de hærdnede egenskaber i beton, ville det med stor sandsynlighed resultere i en kassation som følge af den visuelle kontrol. Resultatet ville enten være en beton med smuldrende kanter eller en beton, som ikke er formstabil. Så længe betonen overholder den visuelle kontrol, må vandet justeres efter ønske for at opnå det forventede resultat. Der stræbes ofte efter det højeste mulige vandindhold, da det øger pakningsegenskaber i den friske jordfugtige beton og dermed både tæthed, holdbarhed og styrke.

– Tilslagsmaterialer

Doseringen af den samlede mængde af tilslagsmaterialer må justeres med op til 10% iht. grundrecepten.

Anvendes der f.eks. 1878 kg tilslag pr. m³ i grundrecepten, må der i den daglige produktion ændres på denne dosering i intervallet 1690 kg - 2065 kg pr. m³ beton. Dette giver mulighed for at have en mere fleksibel produktion hvis tilslagsmaterialerne har mindre ændringer i sammensætning. Benytter producenten sig af kornkurvetilpasning, da er det i stedet de øvre og nedre grænser, som skal overholdes. Kornkurvetilpasning kan give anledning til ændringer større end 10% uden at det anses for væsentlige ændringer, som kræver en gentaget typeprøve.

– Pulverkombination

Doseringen af de enkelte pulvertyper må justeres med op til 6% iht. grundrecepten.

Anvendes der f.eks. 305 kg cement pr. m³ i grundrecepten, må der i den daglige produktion ændres på denne dosering i intervallet 287 kg - 323 kg pr. m³ beton. Det samme gælder for andre mineralske tilsætninger såsom flyveaske og mikrosilica.

Derudover må der ikke ændres i pulverkombination iht. grundrecepten. Ønsker producenten derfor at tilføje flyveaske eller mikrosilica til recepten kræver dette en gentagelse af den indledende typeprøvning.

Produktionsafvigelser

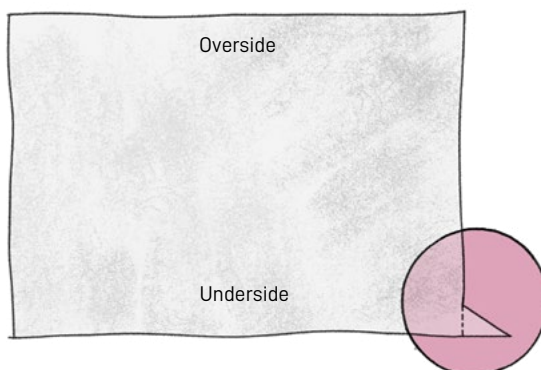
I en produktionsproces vil der under tiden opstå afvigelser fra den ønskede kvalitet. Det er næsten utænkeligt at en betonvareproduktion ikke vil producere afvigelser, som en effekt af de naturlige variationer fra delmaterialer, produktionsanlæg og manuel håndtering. Ofte kan større afvigelser udlignes ved at justere på betonrecepten eller på produktionsanlægget. Det er derfor vigtigt at maskinoperatører og kvalitetsmedarbejdere kender til de mest almindelige produktionsafvigelser. På denne måde kan betonproducentens medarbejdere hurtigt udføre en fejlsøgning og finde en løsning på problemet. En række af de mest almindelige afvigelser relateret til betonen og dens delmaterialer er derfor uddybet her.

Visuelt

Visuelle afvigelser kan ofte være et tydeligt tegn på afvigende betonegenskaber. Derfor er den visuelle inspektion også et af de bedste redskaber til at udføre en grov frasortering af afvigende betonvareprodukter. Den visuelle inspektion indebærer at prøveudtageren visuelt inspicerer produktionen straks efter støbning. En række af fænomener, som typisk vil give afvigelser på det færdige produkt er belyst herunder.

- Fødder

Udtrykket fødder anvendes om de betonrester, som uønsket hæfter sig på betonvarernes nederste kant, vist på skitsen nedenfor.



Figur 88 –
Eksempel på fødder i
betonvareproduktionen.

På billederne herunder ses nogle eksempler på hvordan fødder kan se ud i f.eks. fliseproduktionen.



Figur 88 – Eksempel på fødder i betonvarerproduktionen.

Fødder opstår fordi der ophobes rester af beton mellem formvæggen og støbepladen. Årsagen til denne ophobning af beton stammer typisk fra formlid eller konsistensen af betonen.

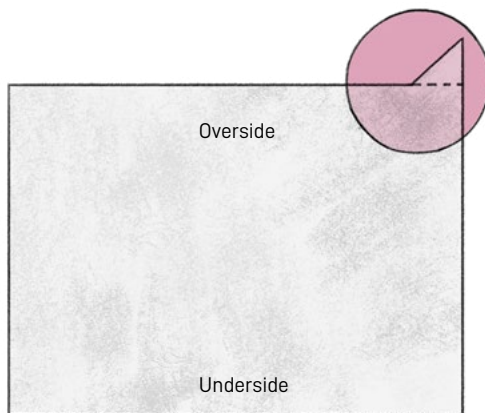
Når betonens konsistens er nærmer sig våd tilstand, som beskrevet tidligere, øges risikoen for at betonens pastaindhold trænger ind i de mindste utætheder mellem støbeplade og formvæg. Når fødder dannes som følge af en våd tilstand i betonen, vil fødderne typisk knække meget let. Derfor er denne type af fødder ikke så kritiske for kvaliteten af det endelige produkt. Selvom betonen har den rigtige konsistens, kan pastaindholdet stadig bevæge sig ved tilførsel af energi fra vibrationer og komprimering. For at undgå problemet med fødder i dette tilfælde er det vigtigt at sammenholdstrykket mellem støbeplade for formvæg er tilstrækkeligt, og at de bevæger sig sammen, så de ikke kommer ud af takt. Dette kan nemlig give plads til at pastaen kan trænge ind imellem formvæggen og støbepladen.

Når fødder opstår som følge af formlid, dannes der typisk kraftigere fødder på betonvarerne. Dette betyder at fødderne ikke knækker af, og påvirker derfor betonvarens dimensioner. Ved et kritisk stort formlid, kan fødderne blive

så store af de overskrider tolerancekravene for produkterne, som derfor skal kasseres. For at undgå problemer med fødder forårsaget af formslid, er det vigtigt at have en løbende kontrol af formsliddet på ens forme.

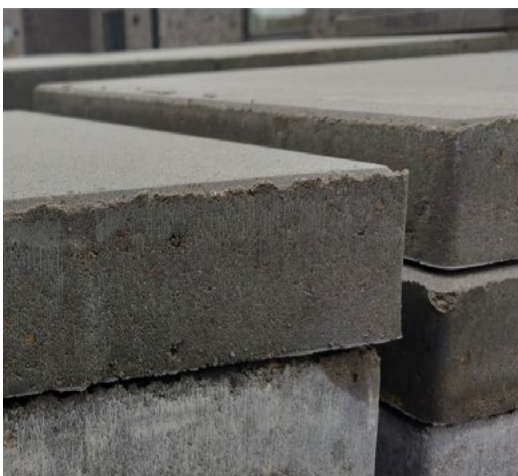
■ Skæg

Udtrykket skæg anvendes om de betonrester, som uønsket hæfter sig til betonvareproduktens overside, vist på skitsen herunder.



Figur 90 –
Skitse af skæg på
betonvarer.

På billederne herunder ses nogle eksempler på hvordan skæg kan se ud i f.eks. belægningsproduktionen.



Figur 91 – Eksempel på skæg observeret på belægningssten.

Skæg opstår typisk som en ophobning af betonrester imellem formvæggen og modholds pladen. Årsagen til skæg er typisk formslid og konsistens af betonen.

Ved en beton som er for våd, kan pastaindholdet lettere trænge ind mellem formvæg og modhold. Samme problem opstår hvis modhold eller formvæg bliver slidt således at betonen kan trænge ind i alle mellemrummene. I tilfælde af beton i våd tilstand kan problemet løses ved at justere betonens vandindhold. Ved formslid kræves der en udskiftning af formen.

Flere producenter anvender en såkaldt blæsebom eller en børste med bløde hår, som begge er monteres efter afformingsprocessen. Da betonresterne, som har dannet skægget, er forholdsvis svage, fjernes disse ved en let luftstrøm eller strøg fra en børste. Det er dog vigtigt at være opmærksom på at blæsebommen kan indstilles så kraftigt, at der opstår udtrørring af betonens overflade. I andre tilfælde kan mere af materialet risikere at blive blæst af. Det er derfor vigtigt at indstille disse efterbehandlinger korrekt, således det ikke svækker produktets holdbarhed eller udseende.

Skæg er mindre kritisk end foder, da skægget ikke påvirker læggemønstret. Det vil dog stadig have en uønsket visuel bivirkning, som kan give anledning til reklamationer, og bør derfor undgås.

■ **Overfladebehandling med coating**

Når jordfugtige betonvarer produceres med farvepigmenter, kan det ved nogle farvenuancer f.eks. sort, være nødvendigt at tilføje en coating til overfladen for at bevare farvenuancen i længere tid. Disse overfladebehandlinger virker kun, hvis de er fordelt ensartet på hele overfladen. Hvis der opstår en uensartet fordeling, vil det ofte være meget tydeligt på det endelige produkt, se eksemplet på figur 82.

Årsagen til en uensartet fordeling kan være mange, men typisk kan det spores tilbage til dyser, betonens tæthed og formslid.

Dyserne som påfører coatingen skal jævnlige rengøres for at sikre en ensartet fordeling over hele produktets overfladeareal. I tilfælde af tilstoppede dyser, vil produkterne have arealer, som ikke er coatede. Dette areal vil ofte opnå



Figur 82 –
Eksempel på
uensartet fordeling
af coating på fliser.

tydeligt forskel i udseende, som minder om det der ses på figuren ovenfor.

Betonens tæthed er afgørende for at coatingen kan virke som forventet. Hvis betonen er for porøs, optages coatingen ned i betonen, og virker derfor ikke efter hensigten. Dette vil både være spild af coating og give et uens overfladeudseende. Det anbefales derfor at teste produkterne for tæthed. Dette kan f.eks. udføres ved at anvende det vakuumapparat, som anvendes til at løfte produkterne ved løbende kvalitetskontrol. De forskellige vakuumapparater har forskellige indstillinger og ofte har producenterne flere betonrecepter. Der bør derfor laves nogle interne mål for hvilket sug der skal til for at opnå en tilstrækkelig tæthed af overfladen på de enkelte produkter. Når dette er fastslået kan producenten køre en indledende produktion. Når den rigtige tæthed er opnået, kan coatingen af produkter igangsættes på den efterfølgende produktion.

Formslid har også stor betydning for coating af overflader på betonvarer. En god tommelfingerregel er at coatede produkter ikke bør laves i en form, som har kørt mere en 15000 takter. Herefter begynder form og modhold at lave overflader med små ujævnheder. Dette kan ses på f.eks. sorte produkter med coating, men vil ikke ses på almindelige produkter. Derfor er det altid en god idé at begynde produktionen af coatede fliser med en form med minimalt slid.

■ Stenreder

Udtrykket stenreder anvendes når der er tale om synlige samlinger af sten, som ikke er omgivet af cementpasta. Stenreder ses typisk som en samling af den største tilslagsfraktion, men kan også dannes af finere tilslagsfraktioner, hvor de største sandkorn samles. Herunder ses et billede af typiske eksempler på stenreder.



Figur 93 – Stenreder observeret i forskellige betonvareprodukter.

Stenreder fremkommer typisk ved en forkert mængde eller hastighed pr. fyldning samt forkert indstilling af tryk og planhed på afstrygningskraber.

Ved manglende opfyldning af formen, risikerer producenten at der ikke er nok materiale til at udfylde alle hjørner og kanter i formen, som vist på figuren ovenfor. Dette kan undgås ved at følge nogle simple tommelfingerregler. Ved enkelt fyldninger, skal den ukomprimerede beton svare til ca. produktets ønskede højde +25%. Ved dobbeltfyldninger skal den ukomprimerede beton svare til ca. produktets ønskede højde +20%. Det vil selvfølgelig variere iblandt forskellige recepter og maskiner, men det er et udmærket udgangspunkt for typiske danske tilslag og betonvarerecepter til jordfugtig beton.

Hvis fyldekassen kører med for høj hastighed, vil materialet typisk samles i enden af formen, og i starten af formen vil der mangle materiale. Det er derfor vigtigt at have indstillet maskinen således at betonen fordeles jævnt i formen.

Stenreder kan også opstå i pudslaget. Når fyldekassen kører frem og tilbage, trækker den ofte en afstrygningskraber efter sig. Hvis denne skraber ikke er plan eller trykket er for højt, kan skraberens begynde at skubbe materialer foran sig. Stenene kan skubbes foran skraberens, hvorved sten fra bagbetonen blandes op i pudslaget og danner stenreder. Det samme kan opstå hvis pudslaget er for fugtigt. Herved kan der opstå en lokal ophobning af klumper bestående af de fine partikler i pudslagsbetonen, som kan være svære at fordele jævnt i formen.

■ Fremmedlegemer

Betonrester

Ved løbende produktion kan der ophobes betonrester på støbeplader, forme, modholdsplader, transportbånd og andet materiel. Betonresterne kan falde ned i formen eller på overfladen af nye produkter. Disse betonrester kan være hærdnet beton eller produceret af andre recepter, hvilket gør at det tydeligt ses, hvis de ligger i overfladen af andre produkter. På figuren nedenfor ses et par eksempler på hvor betonrester enten er indstøbt i en ny beton, eller senere har hæftet sig til overfladen.



Figur 94 – Eksempler på betonrester observeret på produkter. Nogle rester hæfter sig på produktet (tv.), mens andre indstøbes i ny beton (mf. og th.), mens andre indstøbes i ny beton (mf. og th.).

Overfyldning af form og indstilling af afstrygningskraberen er ofte årsagen til at der ophobes betonrester på blokstensmaskinen, som senere kan falde ned i andre produkter. Indstilling af tryk og planhed samt løbende rengøring er derfor vigtigt for produktkvaliteten.

Ved produktion af produkter med pudslag kan overvibration gøre at den jordfugtige beton kompakteres, hvilket forårsager klumpedannelse. Disse klumper kan blokere i løbet af fyldningsprocessen, hvorefter de senere kan falde ned i andre produkter eller forårsage uens fyldning. Derfor anvendes der ofte kun komprimering af pudslaget kombineret med kun meget svag eller ingen vibration, når pudslaget påføres produktet.

Udover en visuel afvigelse, kan betonrester i overfladen forårsage afskalning ved senere eksponering for vand, frost, salt og almindeligt slid. Dette ses bl.a. på eksemplet i figuren herunder.

Figur 95 –
Eksempel på
afskalning af
betonrester i
grå flise.



Silt- og frostklumper

Silt- og frostklumper er et udtryk for de klumper der kan opstå i tilslagsmaterialer, som anvendes i produktionen. Siltklumper er et udtryk for at et øget indhold af finstofpartikler i tilslaget påvirkes af fugt, så der opstår klumpedannelse. Klumperne tørrer ud og bliver hårde, og kan derfor ikke slås i stykker i blandedprocessen. Disse kan ses på figur 96.



Figur 96 – Eksempel på siltklumper i fliser og belægningssten.

Frostklumper er et udtryk for at tilslagspartikler fine såvel som grove fraktioner udsættes for frostpåvirkning og derved holdes sammen i en klump. Disse kan ses på figur 97.



Figur 97 – Eksempel på frostklumper i fliser og belægningssten.

Begge typer af klumper kan være svære at opløse under blandingsprocessen, og ender derfor som et inhomogent fremmedlegeme i det endelige produkt. Hvis klumperne ligger i overfladen eller tæt derpå, kan de oftest identificeres som lyse plamager i overfladen. De lyse nuancer opstår nemlig ved områder med højere porøsitet. Eftersom siltklumper har en øget sug-

evne og frostklumper består af tilslagsmaterialer og frossent vand, er de lyse nuancer ofte en god indikator på klumpedannelse eller andre porøse elementer i overfladen. Det bør derfor undersøges under den visuelle inspektion, ved at udtage enkelte emner til undersøgelse.

Maskindele og andre fremmedlegemer

Blokstensmaskinerne består af mange forskellige dele, som bliver slidt over tid. Derudover kan emballage og andre fremmedlegemer også forurene produktionen i de forskellige processer. Disse fremmedlegemer kan falde ned i betonen, og enten være til fare ved håndtering af produkterne eller ved senere anvendelse og påvirke kundens opfattelse af kvaliteten. Et eksempel på dette kunne være stålkoste.

De fleste modholdsplader renses hver gang formen fyldes. Rensningen foregår ved at en stålkost kører over modholdets overflade. Hvis højden på kosten ikke er indstillet korrekt, kan stålbørsterne knække i bevægelsen hen over modholdsoverfladen. I andre tilfælde kan helt almindeligt slid forårsage af børsterne knække. Resterne af børsterne kan lægge sig i betonvarernes overflade, som efter noget tid fritlægges, og kan herefter være til fare for brugeren. På figur 98 ses nogle eksempler for fremmedlegemer fundet i betonvarer.



Figur 98 – Eksempler på fremmedlegemer i form af maskindele observeret i betonvarer.

Et andet eksempel på fremmedlegemer kunne være organiske rester eller emballage. Alt efter hvordan produktionslinjen er sat op, kan rester fra andre dele af produktionen påvirke overfladeudseendet. Nogle elementer kan nemlig sætte sig fast mens betonen stadig er i frisk tilstand. På figuren herunder er der bl.a. vist overflader med plastikemballage, kul og træfibre.



Figur 99 – Andre typer af fremmedlegemer i betonoverflader, såsom plastik (tv.), kul (mf.) og træfibre (th.).

– Varierende geometri

Højde

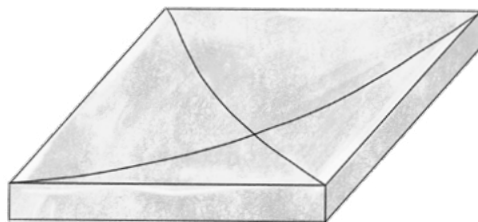
Betonvarernes højde efter komprimering afhænger meget af maskinens indstilling samt betonens evne til at komprimeres. De faktorer, som i det daglige kan ændre betonens evne til at blive komprimeret er oftest vandindholdet. Når vandindholdet er indstillet til en passende mængde, bør maskinens indstillinger efterses, hvis problemet stadig er til stede. Som tommelfingerregel er der tale om dårlig komprimeret beton, hvis et produkt med tykkelsen 60mm kan komprimeres yderligere 2mm ved 2,5x øget modholdstryk eller komprimeringstid. Hvis dette er tilfældet, er produktet ikke komprimeret tilstrækkeligt og enten maskinens indstillinger eller recepten bør efterses. Variationer i højden kan også skyldes problemer med uens eller utilstrækkelig fyldning.

Variationer i højden af den løbende produktion af ens produkter, er både en indikator på om produktet er fornuftigt komprimeret mens også en kritisk kvalitetsparameter for produktets anvendelse. Hvis emnerne er for høje eller lave, vil de kunne kasseres på afvigende dimensioner og i værste tilfælde bevirke til en ujævn overflade når produktet anvendes.

Fordybninger

Udtrykket fordybninger anvendes om de tilfælde hvor betonvarer har opnået en konkav overflade. Dette er typisk resultatet af en slidt/svag støbeplade, ujævn fyldning af form, overvibration og separation af betonen. Et eksempel på fordybninger er vist herunder.

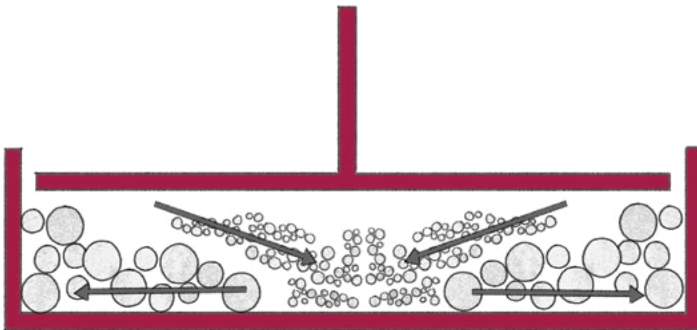
Figur 100 –
Principskitse af
fordybninger i
betonvarer.



Ved anvendelse af svage støbeplader kan pladen bøje under modholdstrykket. Denne bøjning er vil rettes ud når modholdstrykket forsvinder, hvilket kan forårsage revner i produktet. Det kan derfor være nødvendigt at udskifte støbepladerne, hvis de bliver for svage over tid.

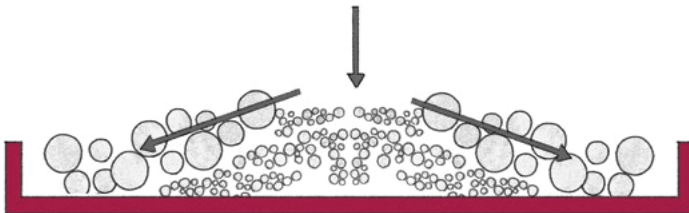
Et andet problem kan være at modholdstrykket er større end modholdet kan bære. I dette tilfælde kan modholdspladens hjørner bukke op. Dette vil ses som en blivende deformation i det endelige produkt, og påvirker derfor produktets geometri.

Når betonen udsættes for overvibration, vil det ofte ses at de store tilslagsfraktioner trækker ud mod siderne, mens de mindre kornpartikler samles i midten. Betonen separerer altså pga. for stor tilført vibrationsenergi. Denne fordeling af partiklerne gør at den komprimerede overflade bliver konkav og danner fordybninger eftersom pakning i midten og langs siderne er forskellig, se figur 101.



Figur 101 – Principskitse for separation ved overvibration.

Det samme ses hvis betonen transporteres for længe og for langt på transportbånd med for mange overgange. Hver gang betonen falder ned på et nyt bånd dannes en kegle af friskblandet beton, hvor de store partikler falder ud til siden, mens de fine partikler bliver i midt. Jo flere gange denne proces sker, jo mere separerer betonen. Når beton fyldes i formene, vil der i de værste tilfælde være en væsentlig større andel af grove partikler i de yderste forme, mens der i de midterste forme er en øget mængde fine partikler. Dette giver både varierende produkter og reducerer pakningsgraden i produktet, se figuren nedenfor.



Figur 102 – Principskitse for separation ved overdriven transport.

Keglevirkningen kan udjævnes ved at placere udjævnings brædder på transportbåndene, så toppene udjævnes, og fordeler materialet jævnt på båndet.

En konkav flise kan også fremkomme ved at anvende svage støbeplader i hærdekammeret. Når pladen bøjer under trykket fra større produkter mens betonen stadig er frisk, vil betonen sætte sig, og hærde i den deformerede tilstand. Derfor bliver produktet konkavt og afviger fra kvalitetsmålene.

Konsekvensen af disse fordybninger er at vand kan samles på midten af

fliserne. Dette skaber en uens overfladeeksponering, som over tid giver et forskelligt overfladeudseende. Ved separation af betonens tilslagspartikler eller ved over vibration, opnås der en lavere pakning i den midterste del af overfladerne. Dette kan give anledning til vibrationskader fordi den midterste del af flisen ikke komprimeres tilstrækkeligt, og risikoen for revnedannelse er derfor øget.

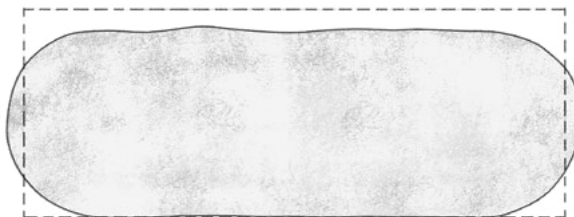
Figur 103 –
Vibrationsrevner
og varierende
overfladeudseende
på konkav overflade
i fliseproduktion.



Tykmavet

Udtrykket tykmavet benyttes til at beskrive den deformation, der sker når jordfugtige betonvarer sætter sig efter afformning, således af de lodrette sider trykkes ud i en buet form, som vist herunder.

Figur 104 –
Principskitsen for
produktion af en
tykmavet betonvare..



Når en betonvare bliver tykmavet, sker det ofte under eller kort tid efter afformning. Dette skyldes ofte at betonens er for våd, men det kan også være forårsaget af en forkert indstilling på modholdstrykket under afformning.

Hvis betonen er for våd, kan det betyde at formstabiliteten ikke er tilstrækkelig. Der skal derfor ingen eller meget lidt energi til at deformere betonen.

Dette kan både ske så snart betonen slipper formen, mens også ved transport til hærdekammeret. I nogle tilfælde ses det også at afformnings processen er skyld i deformationen. Her kan trykket være for stort når modholdet skal holde på produkterne, mens formen løftes op. Så snart betonen ikke længere stabiliseres af formvæggene, kan det høje tryk deformere siderne på produktet.

Konsekvensen af et tykmavet produkt er en afvigelse på dimensionerne, som i sidste ende påvirker lægge-mønsteret. Det er derfor en kritisk kvalitetsparameter som skal overvåges. Det er specielt ved opstart og ved nye leverancer af tilslagsmaterialer, at der kan opstå store variationer i konsistensen, som følge af ændret vandindhold. Det kan derfor være en fordel at køre med øget opmærksomhed ved disse hændelser.

– Delaminering

Udtrykket delaminering benyttes om betonvarer, når der opstår en lagdeling i betonens øverste lag, så der senere er risiko for afskalning af dette lag. Der findes flere typer af delaminering alt efter om der er tale om en et-lags eller to-lags beton.

Et lags

Figuren herunder viser et eksempel på delaminering i en et-lags beton.



Figur 105 – Eksempel på delaminering i et-lags beton.

I et-lags betoner skyldes delaminering ofte at fyldningen af formen ikke er tilstrækkelig og der er derfor for lidt beton i formen. Hvis der ikke er nok materiale i formen vil vibrationerne løsne de forskellige fyldninger fra hinanden, og derved opstår risikoen for senere delaminering. For at undgå dette kan der som udgangspunkt benyttes 2 fyldeslag med vibration efterfulgt af et tredje fyldeslag uden vibration for at udjævne overfladen og sikre en god komprimering.

To lags

For to-lags betoner er den hyppigste årsag til delaminering at der støbes vådt i tørt. Når bagbetonen bliver for tør sammenlignet med forbetonen, opstår der en forskel i fugtigheden på de to betoner. Denne forskel gør, at bagbetonen suger fugt ud af forbetonen, og skaber derfor en svag lagdeling mellem betonerne. Et eksempel på delaminering i to-lags betoner ses herunder.

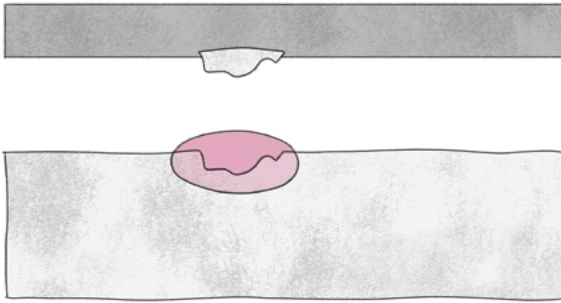


Figur 106 – Eksempel på delaminering i to-lags beton.

Delaminering i både et-lags og to-lags betoner vil ved påvirkning fra vand, frost-tø og transportbelastning vil typisk medføre afskalning af det øverste lag. Det er derfor en væsentlig reduktion af produktkvaliteten. Delamineringen ses ikke før produkterne har været eksponeret i et stykke tid, og derfor er udgifterne ved reklamationer ofte forbundet med både optagning- og nedlægningsudgifter sammen med selve produktionsomkostningerne.

- Napning

Udtrykket napning beskriver når dele af betonen sidder fast i formen og derved efterlader uønskede huller i betonoverfladen, se figuren nedenfor. Årsagen



Figur 108 – Principskitse af hvor modholdspladen (øverst) napper på betonoverfladen (nederst).

til napning er som beskrevet tidligere typisk at betonens er for våd og derved suger betonen sig fast til modholdspladen eller formvæggen. Napning kan dog også fremkomme hvis der er siltklumper til stede i blandingen, da disse klumper lettere hæfter sig på andre overflader, formentlig pga. det høje finstof indhold.

Konsekvensen af napning er et uens overfladeudseende med huller. Hver gang hullerne påvirkes af mekanisk last fra f.eks. transport er der øget risiko for at skaden forværres. Et par eksempler på napning ses herunder.



Figur 108 – Eksempel på napning i betonareoverflader.

Figur 109 –
Napning observeret
ved flisekant.



– Revner

Støbe- og vibrationsrevner

Denne type revner opstår når formen ikke fyldes tilstrækkeligt, og betonen derved har for meget plads til at bevæge sig. Det kan også ske ved en separation af betonen, hvor tilslagsmaterialerne opdeles i grove og fine partikler som bevæger sig hhv. mod form siderne og mod midten. Et eksempel på dette er vist under afsnittet med fordybninger.

Udtørings- og svindrevner

Disse revner opstår typisk inden for de første timer, medens betonen endnu er plastisk. Det skyldes for hurtig udtørring, inden vandet når at reagere med cementen. Dette kan i de fleste tilfælde undgås ved gode hærdeforhold de første 24 timer. Et eksempel på sådanne revner ses på figur 110.

Disse skader opstår typisk i løbet af de første par dage, hvis der ikke er tilstrækkelige hærdeforhold. Gode hærdeforhold vil typisk være høj luftfugtighed på 80-95% relativ luftfugtighed og temperaturer på min. 15-20°C.

Konsekvenser af de fleste revnedannelser er at vand og snavs kan trænge ind i betonvarerne. Vandet kan ved frostpåvirkning forårsage frostsprængninger som følge af vandets udvidelse når det går fra flydende til fast form. Derudover kan snavsset påvirke overfladeudseendet, og det er ikke altid muligt at rengøre revnerne på betonvarerne.



Figur 110 –
Udtørningsrevner
observeret i betonfliser.

– Vand på uhærdnet beton

Når betonvarer lagres i hærdekammeret, er det altid en fordel at have en høj luftfugtighed, da det fremmer hærdeforholdene for produktet. I enkelte tilfælde kan luftfugtigheden blive så høj, at der dannes kondens på de kolde overflader i hærdekammeret. Ved store mængder kondens, kan producenten risikere at vand drypper ned på betonen. Fordi betonen endnu ikke har opnået en tilstrækkelig modenhed, kan dette overfladevand ændre overfladens farvenuancer og danne pletter. Herunder ses et par eksempler på sådanne pletdannelser.



Figur 111 –
Lyse plamager indikerer
hvor kondensvandet
har dryppet ned på
overfladen.

Figur 112 –
Vandpåvirkning af
frisk betonoverflade
ses ved lyse pletter.

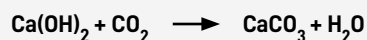


Konsekvensen af den tidlige vandpåvirkning bliver at de små områder, som er blevet eksponeret for vand, bliver lysere og en smule svagere pga. øget porøsitet. Dette påvirker overfladeudseendet så det ikke længere er ensartet. Områderne med pletter kan også i nogle tilfælde være svage og skalle af ved mindre slidpåvirkning.

Kalkudfældninger

Udfældninger på betonoverflader er en kendt problematik for alle betonproducenter og kan give uønskede variationer i betonoverfladens udseende. Der findes flere typer af udfældninger hvor kalkudfældninger er beskrevet i figur 113.

Kalkudfældninger er en betegnelse for kalkforbindelser, som aflejres på betonoverfladen, og er en mekanisme, der har været kendt lige så længe som der er blevet produceret beton og kalkmørtel. Kalkforbindelserne dannes gennem en reaktion mellem calciumhydroxid og kuldioxid, som vist nedenfor.



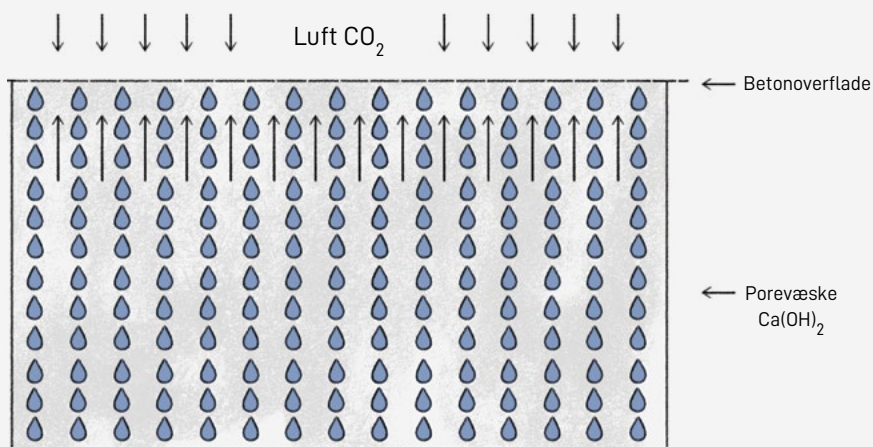
Denne reaktion kaldes også for karbonatisering. Kuldioxid betegnet som CO_2 findes i luften, og calciumhydroxid betegnet som Ca(OH)_2 stammer fra



Figur 113 – Eksempler på kalkudfældninger

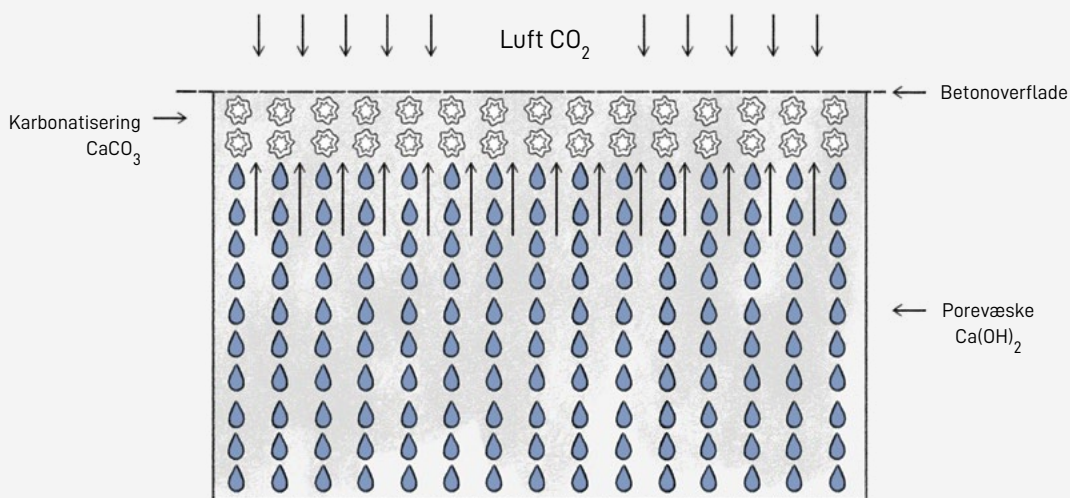
betonen. Når cementen reagerer med vand, dannes en række reaktionsprodukter, heriblandt calciumhydroxid. For cementer af typen CEM I - Portlandcement, omdannes mellem 20 - 25% af cementmængden til calciumhydroxid. Det svarer til at en beton med et cementindhold på 300 kg pr. m³ vil danne ca. 60 - 75 kg calciumhydroxid [47]. Kalkudfældninger vil medføre et lyst kalkslør ved tilstedeværelsen af ca. 1 gram calciumhydroxid pr. m². Der vil altså være rigelige mængder af calciumhydroxid til stede, og der vil derfor altid være en risiko for misfarvninger på overfladen. Imidlertid har en række undersøgelser vist hvordan betonavareproducenter kan reducere risikoen for udfældningerne. For at kunne reducere risikoen er det nødvendigt at forstå hvordan udfældningen af calciumcarbonat CaCO₃ opstår. Derfor er kalkudfældningsmekanismerne uddybet herunder.

Kalkudfældninger kan groft sagt inddeles i primære udfældninger og sekundære udfældninger. De primære udfældninger sker som følge af at betonens overflade er vandmættet i de tidligere faser, mens de sekundære udfældninger bl.a. opstår pga. tidlig udtørring efterfulgt af en senere vandmætning af overfladen. På figuren herunder ses et betontværsnit, hvor de blå dråber markerer de vandholdige områder i betonen, som indeholder opløst calciumhydroxid Ca(OH)₂ i form af Ca⁺ og OH⁻ ioner.



Figur 114 – Eksempel på frisk beton efter støbning.

Over tid vil betonen karbonatisere når luftens indhold af CO_2 reagerer med porevæsken og danner tungt opløselige krystaller af CaCO_3 , som vist på figuren nedenfor.



Figur 115 – Karbonatisering af betonen uden tegn på kalkudfældninger.

Det ses på figuren ovenfor at karbonatiseringen er sket under betonens overflade og der vil derfor ikke være synlige kalkudfældninger. Samtidig vil den karbonatiserede betonoverflade danne et beskyttende lag, som reducerer pH-værdien og øger tætheden af betonen. Mængden af opløst Ca(OH)_2 reduceres ved lav pH-værdi og en tættere beton forlænger transporttiden af Ca(OH)_2 i poresystemet. Begge mekanismer mindsker altså risikoen for fremtidige misfarvninger.

Calciumhydroxid kan kun transporteres gennem væskefasen, og så længe betonoverfladen er fri for vand på væskeform, kan der ikke opstå kalkudfældninger. De primære kalkudfældninger opstår i tilfælde hvor betonoverfladen er mættet med vand, således Ca(OH)_2 gennem vandet kan transporteres ud på overfladen og reagere med CO_2 . Misfarvningerne fra kalkudfældninger kan kun opstå ved en vandpåvirkning af overfladen, transport af opløseligt Ca(OH)_2 , opløsningens reaktion med CO_2 , efterfulgt af en udtørring af overfladen.

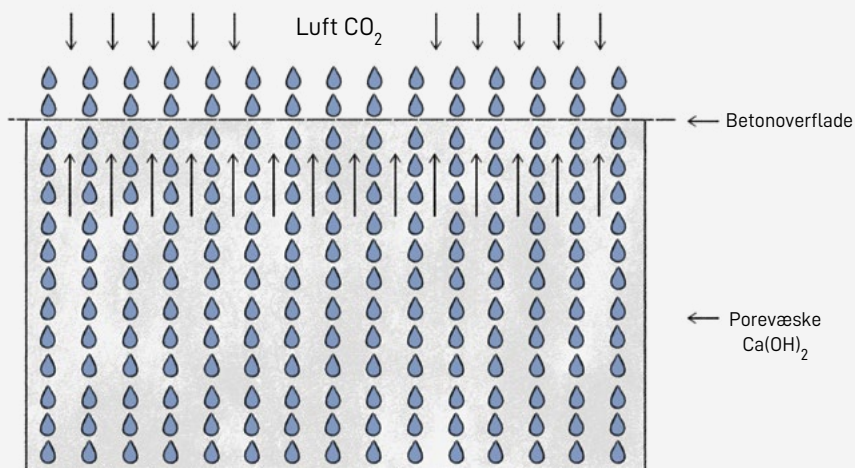
Ved lagring af nyligt støbte betonvareprodukter er der nedenfor nævnt en række årsager som typisk kan føre til opfugtning af betonoverfladen i betonvareproduktionen.

- Stabling af betonvarer direkte på hinanden
- Tidlig påvirkning af regnvand
- Direkte kontakt med plastfolie
- Kondensering af vanddamp i hærdekammer

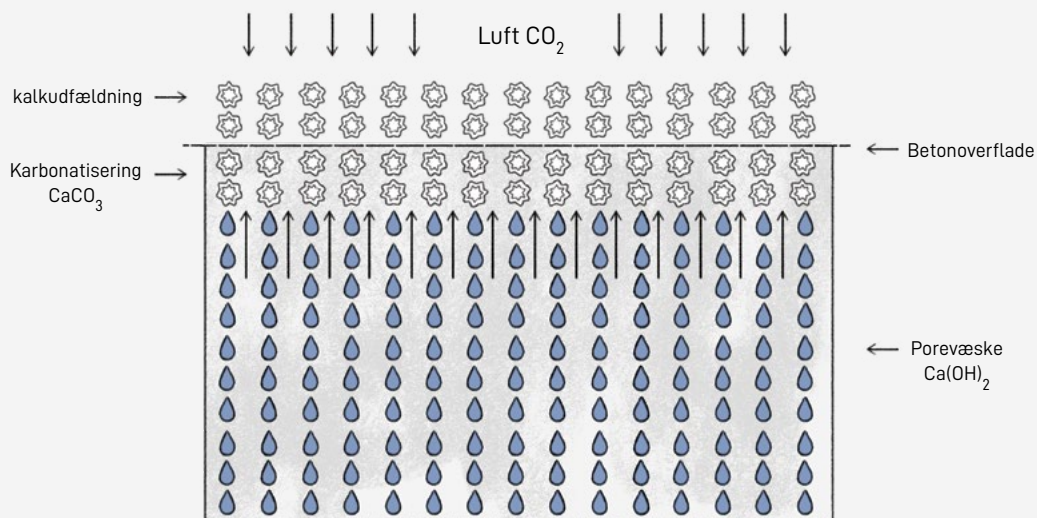
Jo længere tid opfugtningen finder sted, jo mere calciumkarbonat udfælder der. Derfor er specielt stabling af betonvarer et af de største problemer. Ved at stable produkterne ovenpå hinanden kan overskydende vand ikke fordampe, og vil i stedet danne et opfugtet område mellem fliserne. Dette problem øges i takt med hvor tæt produkterne stables. Ved påvirkning af regnvand uden beskyttelse, vil vandet også suges ned gennem stakken. Regnvandet på de yderste produkter vil sandsynligvis fordampe hurtigt og vil derfor ikke give den største risiko for udfældninger. Modsat vil produkterne i midten af stakken holde på vandet i væsentlig længere tid pga. manglende ventilation. Den langvarige opfugtning øger risikoen for kalkudfældninger betydeligt.

- Primære udfældninger

På figur 116 er der vist en illustration af, når betonoverfladen opfugtes og udsættes for primære udfældninger.



Figur 116 - Opfugtet betonoverflade

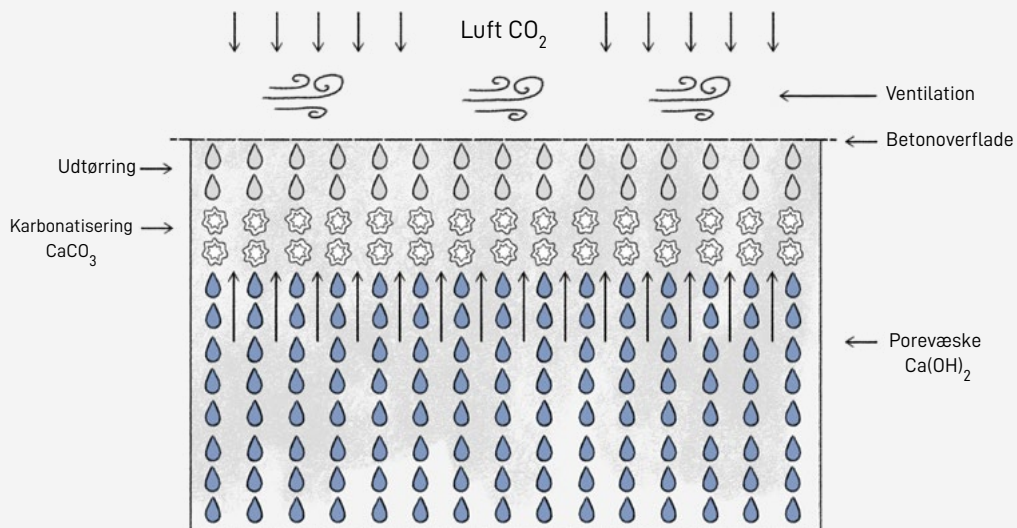


Figur 117 - Kalkudfældninger på betonoverflade, som følge af opfugtning af overfladen.

Opløst Ca(OH)_2 transporteres gennem væskefaserne ud i overfladevandet og reagerer med kuldioxid fra luften og der dannes calciumkarbonat. Ved en senere udtørring, kan calciumkarbonat danne synlige misfarvninger fra kalkudfældningerne, som vist på figur 117.

– Sekundære udfældninger

Som nævnt tidligere findes der også sekundære kalkudfældninger. På figuren nedenfor er der vist en skitse af hvordan en tidlig udtørring af betonoverfladen udtørre betonen så der ikke er nok vand tilgængeligt til at reagere med cementen.

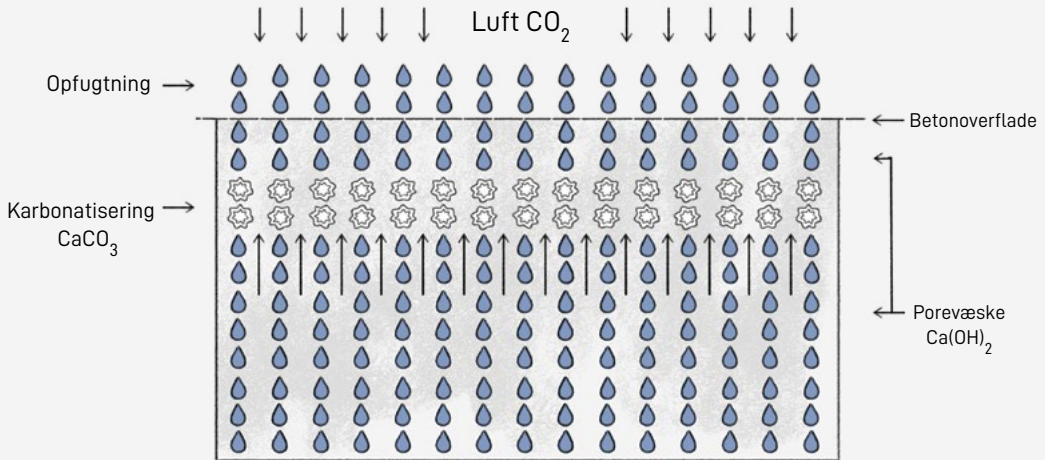


Figur 118 – Tidlig udtørring af betonoverfladen

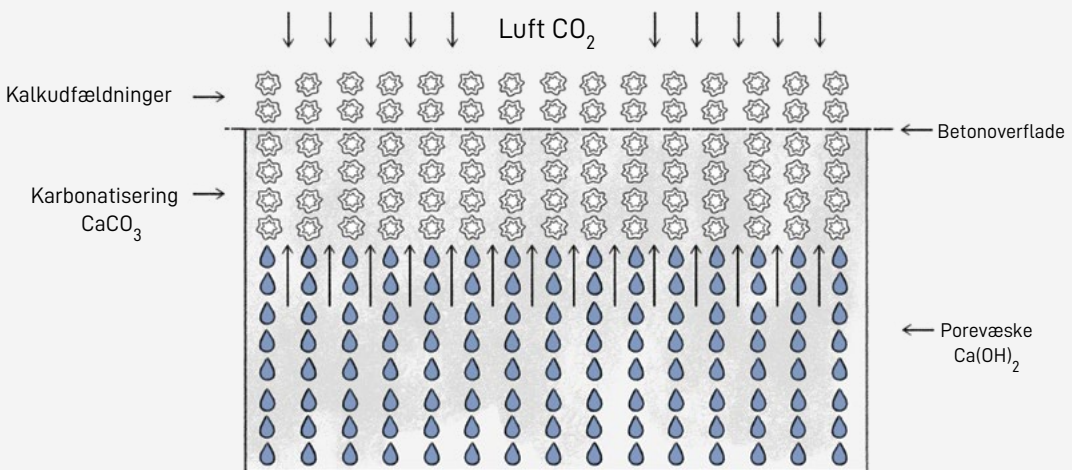
På figuren ovenfor ses det hvordan udtørringen bremser cementreaktionen i beton og derved flyttes det lag som karbonatiseres længere ned i betons tværsnit. Udtørringen af det øverste lag betyder at der findes en del uhydratiseret cement. Det uhydratiserede cement kan senere reagere med vand i forbindelse med opfugtning af betonoverfladen, som vist på figur 119.

Når overfladen igen opfugtes begynder de uhydratiserede cementindhold at reagere med vandet. Derved dannes der igen porevæske fyldt med Ca(OH)_2 ,

som kan udfælde på overfladen og reagere med CO_2 således at der dannes calciumkarbonat. Når vandet på overfladen med opløst calciumkarbonat udtørres, vil der være risiko for synlige misfarvninger i form af kalkudfældninger, som vist på figur 120.



Figur 119 – Opfugning af betonoverflade efter udtørring.



Figur 120 – Sekundære kalkudfældninger tidlig udtørring og senere opfugning.

– Reduceret risiko

Risikoen for at der opstår kalkudfældninger kan som sagt ikke elimineres. Det er dog muligt at reducere risikoen for at få kalkudfældningerne ved at begrænse de mekanismer, som gør udfældningen mulig. Her er nogle af de muligheder betonvareproducenten har for at reducere risikoen, nogle lettere at implementere end andre.

Tiltag i receptdesign fasen

Parameter	Beskrivelse
V/C tal	<p>Vand/cement-forholdet er også et udtryk for porøsiteten af pastaen i betonen. Det er samtidig i pastaens mikroporesystem, at væskefaser kan transportere calciumhydroxid-ioner.</p> <p>Et lavt vand/cement-forhold er et udtryk for et meget fint og tæt poresystem, mens et højt vand/cement-forhold er et udtryk for et grovere og mere porøst poresystem. Ved at sænke vand/cement-forholdet opnår producenten altså opnå et finere poresystem i pastaen, som vanskeliggør transporten af calciumhydroxid-ioner i porevæsken.</p> <p>Dette kan både gøres ved at øge mængden af cement, eller reducere mængden af vand.</p>
Tilsætning	<p>Vandskyende tilsætningsstoffer kan blandes i betonen og har vist at reducere risikoen for udfældninger betydeligt.</p>

Tiltag under hærdefasen

Parameter	Beskrivelse
Øget temperatur	<p>Lav temperatur har indflydelse på en række kalkudfældningsmekanismer, og derfor er det en fordel at øge hærdetemperaturen. Der anbefales således en min. temperatur på 15 - 20 °C.</p> <p>Ved højere temperaturer opnås en hurtigere hærdehastighed, hvilket betyder at pastaen tager kortere tid om at udvikle en tæt po-</p>

restruktur samtidig med at fugtigheden i betonen reduceres. Den reducerede fugtighed og finere porestruktur reducerer pastaens evne til at transportere calciumhydroxid til overfladen.

Karbonatiseringen forløber hurtigere ved høje temperaturer. Derfor udvikles det beskyttende lag, som begrænser opløsningen af calciumhydroxid i porevæsken pga. sænket pH-værdi også hurtigere.

Calciumhydroxid er mindre opløseligt ved højere temperaturer, hvilket reducerer risikoen for udfældninger.

Øget
Luftfugtighed

Lav relativ luftfugtighed øger fordampningen af vand fra overfladen, og luftfugtigheden bør derfor øges for at undgå sekundære kalkudfældninger. Det er dog vigtigt at undgå kondensering på overfladerne, da direkte vandpåvirkning vil øge risikoen for udfældninger og der anbefales derfor en tilstræbt fugtighed på 80 - 95% RF.

Øget CO₂
- indhold

Ved at øget mængden af CO₂-indhold i hærdekammeret, vil det beskyttende karbonatiserings lag udvikles hurtigere. I praksis kræver det et tæt hærdekammer og en tilførsel af CO₂, som sjældent ses anvendt i Danmark. Flere produktioner i Tyskland og USA anvender specielle gasfyrede fordampningsanlæg, som udover en øget temperatur, giver et CO₂-indhold 300 x højere end atmosfærisk luft [48]. I praksis vil CO₂ indholdet i hærdekamre og støbehaller være meget lavt.

Lang
Lagringstid

Ved at lade produkterne hærde i længere tid opnås en tættere beton med lavere fugtighed, der ligesom tidligere nævnt reducerer transporten af calciumhydroxid til overfladen.

Tiltag under efterbehandling

Parameter	Beskrivelse
Coating	Ved at påføre en vandskyende coating efter tiden i hærdekammeret, kan betonen beskyttes imod at opfugtning af overfladen får kontakt med porevæsken.
Ventilation	Ved at skabe muligheden for ventilation omkring produkterne efter palletering undgås langvarig ophobning af regnvand og fugt. Afstanden kan opnås med f.eks. afstandsbrikker, og minimumsafstand på ca. 5mm er nødvendig for at opnå fri luftcirkulation.

Et godt eksempel på ventilationens effekt kan ses fra nogle af Aalborg Portlands laboratorieprøvninger herunder.



Figur 121 – Betonoverflader m./u. ventilation. Tv. ses overfladen fra fliser, som har været lagret med 10mm afstandsbrikker. Th. ses overfladen fra fliser, som har været lagret helt tæt op ad hinanden.

Brune udfældninger

Forskellen på brune(jern-) udfældninger og kalkudfældninger er at der udfældes jernforbindelser på overfladen. Jernforbindelser kan nemlig danne de rødlig/gullige/brunlige udfældninger. Betonvareproducenterne kan under produktions- og lagringsprocessen reducere risikoen for brune udfældninger ved at hæve temperaturen til $>15^{\circ}\text{C}$ og sikre en tilstrækkelig luftfugtighed 80 - 95% RF. Derved opnås bedre hærdeforhold og betonen opnår derved en hurtigere tæthed og karbonatisering, som besværer opløsning af jernforbindelser i porevæsken og transport til overfladen.

Figur 122 –
Eksempel på brune
udfældninger.



Jernforbindelser findes indimellem også i tilslagsmaterialerne, hvilket giver mere lokale pletdannelse. Disse udfældninger forekommer sjældent, men kan forekomme hvis tilslagsmaterialerne indeholder jernholdige partikler. Et eksempel på dette ses på figur 123 og 124.



Figur 123 – Forskellige former for jernudfældninger [14].



Figur 124 – Eksempel på jernholdig tilslagspartikel i overfladen.

Produktkontrol

Produktkontrollen er med til at sikre at produktionen af betonvarer overholder de krav, som standarden foreskriver mht. dimensioner, mekaniske egenskaber og holdbarhed. Produktkontrollen udføres ved at udtage en stikprøve af produktionen i overensstemmelse med reglerne forskrevet i den gældende standard. Tidsintervallet imellem to stikprøver må ikke blive for stort mht. produktionsdage. Derudover må antallet af prøveemner i en stikprøve ikke være for få. Jo flere produktionsdage, der går imellem hver stikprøve og jo færre prøveemner pr. stikprøve, jo mindre bliver sandsynligheden for at stikprøverne fortæller noget om den mellemliggende produktion. Standarden kræver derfor at enten tidsintervallet reduceres eller stikprøvestørrelsen øges, hvis produktionen er ude af kontrol. Standarden giver samtidig en mulighed for at øge tidsintervallet mellem stikprøverne eller reducere antallet af prøveemner pr. stikprøve, hvis produktionen er stabil, og producenten kan vise at den er i kontrol. Tidsintervallet imellem stikprøverne og antallet af prøveemner pr. stikprøve er bestemt i produktstandarden. For at sikre kvaliteten af de produkter, som er produceret imellem stikprøverne, udføres også en visuel kontrol.

Standarden giver mulighed for at udføre produktkontrollen efter to forskellige principper hhv. efter Egenskaber eller Variabler. Begge metoder tillader at gruppere produkter og recepter med tilsvarende egenskaber i såkaldte "familier". Testresultaterne for et vilkårligt produkt i en bestemt familie, repræsenterer således hele familien. Disse familier kaldes for Styrke- og Overfladefamilier.

Godkendelse efter egenskaber

Godkendelse efter egenskaber betyder at resultaterne for de enkelte prøveemner i stikprøven, skal være i overensstemmelse med kravene givet i standarden. Vurderingen af hver enkel stikprøve baseres altså alene på den aktuelle prøve og tidligere prøvers resultater, har ingen indflydelse på resultatet.

Godkendelse efter variabler

Ved at registrere de løbende resultater fra produktprøvningen i et kvalitetssystem som f.eks. AP Quality 1338, -1339, -1340 eller -771-3 kan betonvareproducenten benytte sig af godkendelse efter variabler. I stedet for at vurdere

hvert enkelt prøveemne, anvendes den statistiske variation for produktionsanlægget til at vurdere om stikprøven kan godkendes. Det betyder, at jo mere ensartet produktionsanlægget kan producere, jo mindre overstyrke skal betonen designes med. Betonvareproducenten kan altså optimere sit materialeforbrug og produktenskaber hvis produktionsanlægget leverer en stabil og ensartet kvalitet.

Styrkefamilier

Begrebet styrkefamilie dækker over en samling af produkter, som er produceret på samme anlæg, med de samme typer af delmaterialer. Disse produkter kan godt have forskellige dimensioner og farver, da dette ikke antages at påvirke receptens styrke betydeligt.

Overfladefamilier

Begrebet overfladefamilier dækker f.eks. over en samling af produkter med pudslag, som indeholder de samme grundtilslag i recepterne, og som har gennemgået sammen overfladebehandling som færdigt produkt. Disse produkter kan godt have forskellige dimensioner og farver, da dette ikke antages at påvirke receptens overfladeegenskaber betydeligt.

Prøvningshyppighed

Betonvareprodukterne skal testes for de egenskaber, som er relevante for at kunne sikre en god produktkvalitet. Prøvningshyppigheden afhænger bl.a. af den nødvendige nøjagtighed og den forventede variation for de aktuelle egenskaberne. Der forventes f.eks. ikke stor variation på frost-tø resultater, eftersom sammensætningen af betonrecepten ikke ændres løbende. Til gengæld afhænger betonvarernes dimensioner af flere parametre såsom fugtindhold og formslid, som forventes at variere løbende. Prøvningen af egenskaber med en forventet øget variation har naturligvis en øget prøvningshyppighed. Standarderne foreskriver hvor ofte betonvareprodukterne skal prøves for forskellige egenskaber. Nedenfor gennemgås et eksempel på produktprøvning af udseende iht. DS/EN 1340 Kantsten af beton. Der findes lignende regler for belægningssten, fliser og byggesten.

– Eksempel – Produktprøvning, Udseende, Kantsten af beton

Betonvareproducenten ønsker at overholde kravene til en kantstensproduktion mht. kontrol af udseende. Derfor undersøges standarden for de gælden-

A.4 Produktkontrol

Emne	Formål	Metode	Hypighed ^{1),2) 3,}	
A.4.1 Produktprøvning				
1	Udseende	Se 5.4	Visuel inspektion	Dagligt
2			Anneks J	I tvivlstilfælde (prøve med 10 kantseten.
3	Form og dimensioner ²⁾	Se 5.2	Anneks C	Otte emner for hver produktionslinje hver fjerde produktionsdags.
4	Bøjningsstyrke	Se 5.3.3 – tabel 3	Anneks F	Otte kantsten for hver styrkefamilie og hver produktionslinje hver fjerde produktionsdag uafhængigt af størrelse.
5	Pudslagets tykkelse	Se 5.1	Anneks C	Otte kantsten for hver styrkefamilie og hver produktionslinje hver fjerde produktionsdag uafhængigt af størrelse.
6	Vejrbestandighed (kun klasse 2)	Se 5.3.2	Anneks E	For hver overfladefamilie hver femte produktionsdag.

Figur 125 – Eksempel på produktprøvning af kantsten jf. DS/EN 1340 [1].

de krav. På nedenstående figur, ses et uddrag fra DS/EN 1340 pkt. Anneks A.4 Produktkontrol.

Det ses at produktprøvning af udseende er beskrevet under emne 1 og 2. Producentens kontrollant ønsker at anvende metoden "visuel inspektion". Det ses ud fra standarden at prøvningshyppigheden er "dagligt". Kontrollanten bør som minimum inspicere betonvarerne for typiske produktionsfejl, som er beskrevet i afsnittet "Produktionsfejl, Udseende". Betonvarer som er omfattet af tredjeparts overvågning fra Betonvarekontrollen (BVK), skal i flere tilfælde overholde nogle skærpede krav. Kontrollanten bør i dette tilfælde gøre sig bekendt med de relevante punkter i BVK's Kvalitetsmanual.

Mærkning og deklarerationer

For at producenter og kunder kan identificere tidligere producerede partier, er der i standarden krav til mærkning af betonvareproduktionen. Der skelnes mellem mærkning af varer/emballeringsenheder, produktdeklaration/handledsdokumenter og CE-mærkning.

Belægningssten, fliser og kantsten

For produkttyperne belægningssten, fliser og kantsten skal producenten overholde følgende regler til mærkning.

– Varer/Emballeringsenhed

Producenten skal som minimum udføre en mærkning af 0,5% af de producerede emner. Derudover skal hver emballeringsenhed have mindst én mærkning. Ved genbrug af emballage skal der tilføjes en ny mærkning.

Mærkning af varer/emballeringsenheder skal som minimum indeholde følgende information.

- Producentens eller fabrikkens identifikation
- Produktionsdato
- Tidlig levering*
- Fastsættelse af klasse(r)**
- Nummeret på den europæiske standard

* I tilfælde af levering tidligere end det deklarerede tidligste anvendelsestidspunkt, skal det tidligste anvendelsestidspunkt fremgå af mærkningen. Som alternativ kan dette fremgå af leveringsdokumenterne.

** Der er krav til at mærkningen indeholder information om produktets klassificering af følgende egenskaber. Mærkning kan enten vises som deklareret værdi eller som vist herunder.

Kasser:	Mærkning:
Vejrbestandighed	A, B eller D
Slidstyrke	F, H eller I
Betonstyrke	S, T eller U

– Produktdeklaration/Handelsdokumenter

Producenten skal på produktdeklaration ellers handelsdokumenter have følgende mærkning.

- Producentens eller fabrikkens identifikation
- Tidlig levering*
- Fastsættelse af klasse(r)**
- Nummeret på den europæiske standard
- Identifikation af produktet

* I tilfælde af levering tidligere end det deklarerede tidligste anvendelsestidspunkt, skal det tidligste anvendelsestidspunkt fremgå af mærkningen. Som alternativ kan dette fremgå af mærkningen på varer/emballeringsenheder.

** Samme mærkning som for varer/emballeringsenheder.

Betonbyggersten

Ved levering af betonbyggersten skal producenten tydeligt have udført mærkning på mindst én af de følgende placeringer: emballage, følgeseddel, produktcertifikat eller 5% af de leverede emner. Producenten skal dog som minimum påføre mærkning på 4 emner per emballeringsenhed. Mærkningen skal indeholde information om følgende:

- Navn, varemærke eller anden form for identifikation af producenten
- Produktionsdato
- Identifikation af produktets beskrivelse og betegnelse


Beskrivelse, betegnelse og klassificering

For at udføre en korrekt beskrivelse af et byggerstensprodukt, skal producenten informere om følgende produktinformationer.

- Nummer og udgivelsesdato på den gældende europæiske standard
- Type af byggersten
- Nominelle dimensioner og tolerancer
- Betonstyrke
- Beskrivelse af egenskaber, Konfiguration og udseende*

*De relevante oplysninger om konfiguration kan oplyses hvis det er relevant for anvendelse.




Eksempel – Produktdeklaration, Belægningssten iht.DS/EN 1338

<p>CE</p> <p>Gammelrand Beton A/S Gl. Skovvej 6A, 4470 Svebølle 05</p> <p>DanCert certifikat nr. B042-02</p>	<p>Ydeevnedeklaration nr.: Herregårdssten 5,5 og 7 cm</p> <p style="text-align: right; font-size: small;">Af dato: 2018-02-14 erstatte dato: 2013-06-16</p> <p>Varetype: Belægningsstens serie Rumlet Herregårdssten 5,5 og 7 cm Europæisk standard DS/EN 1338:2004, DS/EN 1338/AC:2006</p>																																																																																												
<p>Generelt Betonbelægningssten til ude- og indendørs brug. Produceres i 1 lags eller 2 lags beton</p> <p>Egnet til gående og let trafik Anvendelsestidspunkt 5 HD (Hærdedøgn)</p> <p>På www.gammelrand.dk findes en vejledning i lægning af betonfiser.</p>																																																																																													
<p>Type Rumlet Herregårdssten</p>																																																																																													
<p>Byggemål</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 15%;">Bredde</td> <td style="width: 10%;">cm</td> <td style="width: 10%;"></td> <td style="width: 10%;"></td> <td style="width: 10%;"></td> <td style="width: 10%;"></td> </tr> <tr> <td>Længde</td> <td>cm</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table> <p>Dimensioner</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td rowspan="3" style="width: 15%; text-align: center;">Klasse 2</td> <td style="width: 10%;">Bredde</td> <td style="width: 10%;">mm</td> <td style="width: 10%;"></td> <td style="width: 10%;"></td> <td style="width: 10%;"></td> </tr> <tr> <td>Længde</td> <td>mm</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>tolerance</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>Tykkelse</td> <td>mm</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>tolerance</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>forskel på 1 sten</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	Bredde	cm					Længde	cm					Klasse 2	Bredde	mm				Længde	mm					tolerance						Tykkelse	mm						tolerance						forskel på 1 sten				<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 20%;"></td> <td style="width: 20%; text-align: center;">Hel</td> <td style="width: 20%;"></td> <td style="width: 20%;"></td> <td style="width: 20%;"></td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">14</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">21</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td style="text-align: center;">138</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td style="text-align: center;">208</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td style="text-align: center;">+/- 2 mm</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">55</td> <td style="text-align: center;"> </td> <td style="text-align: center;">70</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td style="text-align: center;">+/- 3 mm</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td style="text-align: center;">max 3 mm</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>		Hel					14					21						138					208					+/- 2 mm				55		70				+/- 3 mm					max 3 mm		
Bredde	cm																																																																																												
Længde	cm																																																																																												
Klasse 2	Bredde	mm																																																																																											
	Længde	mm																																																																																											
		tolerance																																																																																											
	Tykkelse	mm																																																																																											
		tolerance																																																																																											
		forskel på 1 sten																																																																																											
	Hel																																																																																												
	14																																																																																												
	21																																																																																												
		138																																																																																											
		208																																																																																											
		+/- 2 mm																																																																																											
	55		70																																																																																										
		+/- 3 mm																																																																																											
		max 3 mm																																																																																											
<p>Fas Ingen</p> <p>Afstandsknaster Ingen</p> <p>Pudslag min. 4 mm</p> <p>Brandmodstand Klasse A1 - kommissionsbeslutning 96/330/EF</p> <p>Udendørs brandegenskab Opfyldt - kommissionsbeslutning 2000/553/EF</p> <p>Afgivelse af aspest Intet indhold</p> <p>Karakteristisk spaltetrækstyrke 3,6 MPa</p> <p>Friktion Tilfredsstillende</p> <p>Varmeledningsevne NPD</p> <p>Frost/tø bestandighed Klasse 3 - max 1,0 kg/m²</p> <p>Farlige stoffer Ikke relevant</p>																																																																																													

NPD = Ingen ydeevne fastlagt (No Performance Determined)

Figur 126 – Produktdeklaration fra en dansk producent af belægningssten, og placering af informationer (1) 1) Producentens identifikation; 2) Identifikation af produkt og gældende europæisk standard; 3) Tidligste anvendelsestidspunkt; 4) Fastsettelse af klasser.

Eksempel – Produktdeklaration, Byggesten iht. DS/EN 771-3

 09 1073-CPR-B272	 35 cm Leca rilleblok 39 cm Leca rilleblok 45 cm Leca rilleblok	Skagen Beton 272 
DS/EN 771-3+A1:2006 Byggesten af beton med lette tilslag Ydeevnedeklaration nr.: EN 771-3 kategori I – K19492xx		
Produktnavn: Leca rilleblokke		
Beskrivelse: Leca rille-blokke i kategori 1 med isoleringskerne til fundament og Ydervægge i passiv, moderat eller aggressiv miljøklasse		
Egenskab		Deklareret værdi
Dimensioner	Længde	490 450 390
	Højde	190 190 190
	Bredde	350 390 450
Dimensions tolerancer	Kategori	D1
	Længde	-3 / +3 (bedre end D1)
	Højde	-3 / +3 (bedre end D1)
	Bredde	-3 / +3 (bedre end D1)
	Planhed Parallellitet	Ikke relevant Ikke relevant
Konfiguration: Se næste side		
Trykstyrke		2,6 (5%-fraktil) Prøveretning: Vinkelret på liggeflade Konditionering: Lufttør tilstand Afretning: Mellellæg af 12 mm bløde fiberplader
Fugtbevægelse		NPD ¹⁾
Forskydningsstyrke		0,15 (tabelværdi fra DS/EN 998-2)
Vedhæftningsstyrke		NPD
Brændbarhed:		Euroklasse A1 (Tabelværdi DS/EN 13501-1)
Vandoptagelse		Må ikke være ubeskyttet ²⁾
Vanddampgennemtrængelighed		5/15 (tabelværdi fra DS/EN 1745)
Direkte luftfydisolering	Bruttodensitet	630 (Toleranceområde: 567-693)
	Konfiguration	Se ovenfor
Varmeledningsevne: $\lambda_{10,0\%P=50\%}$		0,17 (Tabelværdi DS/EN 1745)
Frost/tø bestandighed		Kan anvendes i aggressiv miljøklasse ³⁾
Farlige stoffer		Ikke relevant

NOTE:

- 1) NPD = "No performance determined" (ingen ydeevne fastlagt)
- 2) Kælderydervægge af Lecarilleblokke skal tætnes omhyggeligt med berapning, asfaltering og derefter udkastning med cementmørtel. Tætning føres helt ned på fundamentsbetonen under blokkene.
- 3) Frostsikkerhed – også under særligt udsatte forhold – er en egenskab, der for Lecablokke er dokumenteret både gennem mangeårig anvendelse og ved forsøg, jvf. f.eks. DTI rapport "Optøning af frosne lecablokke med gasbrænder", Rapporten kan ses på www.bib-blokke.dk

Figur 127 – Produktdeklaration fra en dansk producent af byggesten, og placering af informationer [9].

1) Identifikation af producent; 2) Type af byggesten; 3) Dimensioner og tolerancer; 4) Trykstyrke; 5) Beskrivelse af egenskaber og konfiguration.

Mærkning af produkter

Som en del af kravet til mærkning af betonvarer, skal en bestemt mængde af de producerede emner mærkes med information, som beskrevet ovenfor. Dette er for at sikre sporbarheden mellem emner og produktdeklaration efter at emballagen er fjernet. Det er vigtigt at mærkningen af emnerne har en vis bestandighed, så de kan aflæses efter produktionen og frem til anvendelsen. Kvaliteten af mærkningen kan blive påvirket af flere faktorer bl.a. påmalingstidspunkt i processen og typen af farvemiddel. Derfor er det et krav til producenten at produkterne skal genmærkes senest 6 måneder efter produktionsdatoen.

Arbejdssikkerhed

Ved produktion af beton er medarbejdersikkerheden mindst lige så vigtig, som at opnå en god kvalitet. For at opnå et sikkert arbejdsmiljø er det vigtigt at medarbejdere, som beskæftiger sig med beton og dets delmaterialer forholder sig til de nødvendige sikkerhedsforanstaltninger, som anbefales for de enkelte produkter. Ved arbejde med beton og de mest almindelige delmaterialer vil følgende to faresymboler typisk optræde.



Figur 128 – Faresymboler som hyppigt ses ved arbejde med beton. Faresymbolerne står for ætsende (tv.) og sundhedsfare (th.) [45].

Symbolerne indikerer at brugeren skal være opmærksom på at håndtering af materialerne med disse symboler kan være forbundet med en sundhedsmæssig risiko. Typiske sikkerhedsforanstaltninger er beskrevet nedenfor.

Ætsende

Det ætsende faresymbol indikerer at produktet kan ætse metaller og forårsage svære forbrændinger af huden og øjenskader. Eksempler på emner i betonproduktionen, som kan bære dette mærke, er f.eks. cement og til sætningsstoffer. De typiske sikkerhedssætninger for produkter med dette mærke ses herunder [45].

- Indånd ikke pulver, røg, gas, tåge, damp, spray.
- Vask eksponerede områder grundigt efter brug.
- Bær beskyttelseshandsker, beskyttelsestøj, øjenbeskyttelse og ansigtsbeskyttelse.

Der gælder ikke det samme for alle produkter og de relevante oplysninger for hvert enkelt delmateriale vil fremgå af det aktuelle sikkerhedsdatablad.

Sundhedsfare

Symbolet for sundhedsfare indikerer at produktet kan øge risikoen for en række af sundhedsfarer, som vist herunder.

- Kan forårsage irritation af luftvejene
- Kan forårsage sløvhed eller svimmelhed
- Kan forårsage allergisk hudreaktion
- Forårsager alvorlig øjenirritation
- Forårsager hudirritation
- Farlig ved indtagelse
- Farlig ved hudkontakt
- Farlig ved indånding

Eksempler på emner i betonproduktionen, som kan bære dette mærke, er f.eks. pulvrematerialer og tilsætningsstoffer. De typiske sikkerhedssætninger for produkter med dette mærke ses herunder [45].

- Undgå indånding af pulver, røg, gas, tåge, damp, spray.
- Brug kun udendørs eller i et rum med god udluftning.
- Ved indånding: Flyt personen til et sted med frisk luft og sørg for, at vedkommende hviler i en stilling, som letter vejrtrækningen.
- I tilfælde af indtagelse: I tilfælde af ubehag ring til en GIFTINFORMATION eller en læge.
- Bær beskyttelseshandsker / beskyttelsestøj / øjenbeskyttelse / ansigtsbeskyttelse.
- Ved kontakt med huden: Vask med rigelig sæbe og vand.
- Ved kontakt med øjnene: Skyl forsigtigt med vand i flere minutter. Fjern eventuelle kontaktlinser, hvis dette kan gøres let. Fortsæt skylning.

Der gælder ikke det samme for alle produkter og de relevante oplysninger for hvert enkelt delmateriale vil fremgå af det aktuelle sikkerhedsdatablad.

Krom-neutralisering

Alle Aalborg Portlands cementer er designet med et lavt indhold af vandopløseligt kromat ≤ 2 mg pr. kg. Cement. Dette sikrer at brugere i daglig kontakt med cement og beton ikke udvikler kromateksem. Før 1980'erne var det ikke ualmindeligt at betonarbejdere oplevede lidelsen "kromateksem", som en allergisk reaktion overfor kromat. Lidelsen kunne med tiden opstå ved hyppig kontakt med frisk beton eller mørtel. I dag stort set elimineret i den danske cement- og betonbranche.

Litteraturliste

- [1] DS/EN 1340:2004
- [2] <https://byggevaerinfo.dk/>
- [3] DS/EN 1339:2004
- [4] <https://www.rc-beton.dk>
- [5] <https://brochure.ibf.dk/afvandingskantsten/#/>, Brochure, Afvandingskantsten, IBF
- [6] https://rbr.dk/wp-content/uploads/2019/02/RBR-Aarskatalog-2019_web_single.pdf, Brochure, Årskatalog-2019, RBR Betonvarer
- [7] <https://brochure.ibf.dk/Belgning/Fliser/flisen-i-byen/#/>, Brochure, Flisen i Byen, IBF
- [8] DS/EN 771-3:2011+A1:2015
- [9] <https://skagenbeton.dk/>
- [10] <https://www.ibf.dk>
- [11] <https://www.gammelrand.dk/>
- [12] DS/EN 1338:2004
- [13] Selvkompakterende beton - SCC, 2-13-2004, Jacob T. Et. Al.
- [14] Betonbelægninger - Håndbog om belægninger, trapper og støttemure 2019
- [15] <http://www.voscc.dk/17999,3>, TI SCC Beton
- [16] IS 456 (2000): Plain and Reinforced Concrete - Code of Practice
- [17] Cement and concrete as an engineering material: An historic appraisal and case study analysis, 2014, Colin R.Gagg
- [18] DS 423.17:1984
- [19] DSEN 1992-1-1 + AC:2008
- [20] Betonhåndbogen, 10 Hærdende- og hærdnet beton, C. Vestergaard Et. Al.
- [21] Beton-bogen, 2. udgave 1985, A. D. Herholdt Et. Al.
- [22] Optimering af vandindhold i betonvarebeton mht. styrke og overflade, E.P. Nielsen
- [23] Properties of concrete 5th edition 2011, A.M. Neville
- [24] DS/EN 206 DK NA:2019
- [25] EN 12620:2002+A1:2008
- [26] BVK Manual revideret d. 2013-09-17

- [27] The link between different particle characterization techniques, 2015, A. Hill
- [28] Packing Density and the rheology of concrete, 2012, X. Chateau
- [29] Pakningsberegninger som hjælpemiddel ved betonproportionering, 1999, M. Glavind Et. AL.
- [30] Packing Density and the rheology of concrete, 2012, X. Chateau
- [31] EN 206:2013+A1:2016
- [32] Cement og Beton 22. udgave 2016, Aalborg Portland
- [33]<https://nptel.ac.in/courses/113104073/>, Fundamentals of Materials Processing, Professor Shashank Shekhar, Department of Material Science and Engineering, Indian Institute of Technology Kanpur, Lecture 37, Particle Packing, NPTEL 2016
- [34] Using particle packing technology for sustainable concrete mixture design, 2012, Sonja A.A.M. Fennis Et. AL.
- [35] Gør det lettere at gøre det selv 7. udg, 2015, Aalborg Portland
- [36] EMC - Early age behavior 2010, G. Hüsken Et. AL.
- [37] Applied Hydrogeology (4th Edition) 2000, C.W. Fetter
- [38] Extent of Capillary Rise in Sands and Silts 2016, Rachel Salim
- [39] The influence of the fines on the Early-Age behavior of Zero-Slump Concrete, Hüsken, G. Et. AL.
- [40] Properties of Fresh and Hardened Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials 2018, Nele De Beile Et. AL.
- [41] Betonhåndbogen 2019, 19.11 Betons holdbarhed, Gitte Normann Munch-Pedersen
- [42] Egenskaber hos beton tilsat flyveaske 1978, Eigil V. Sørensen, Aalborg Portland
- [43] Optimizing the use of fly ash in concrete 2007, Michael Thomas
- [44] <http://www.betonvarekontrollen.dk>
- [45]<https://echa.europa.eu/da/regulations/clp/clp-pictograms>, CLP Piktogrammer, ECHA
- [46] Kalkudblomstringer på betonoverflader 1977, Paul Samuelsson
- [47] Kalkudblomstringer på betonoverflader 2000 - Thorkild Rasmussen, Dansk beton artikel
- [48] De upopulære kalkudblomstringer 2010, Lasse Frølich
- [49] DS/EN 772-1:2011+A1:2015
- [50] BASF produktmateriale
- [51] What are the varieties of water-retaining and thickening material, Sidley Chem, 2016
- [52] Leca, Danmark

Jordfugtig betontechnik

Beton er det mest anvendte byggemateriale i verden. Det er bl.a. tilgængeligheden af delmaterialer, der gør det yderst aktuelt at anvende til byggeriet på verdensplan. Hvad gør beton til et godt byggemateriale, og er der begrænsninger på anvendelsen af betonen?

De følgende afsnit omhandler udvalgte egenskaber, som er vigtige for at forstå betontechnologien, samt hvad materialet kan bruges til. Det er samtidig en introduktion til produktion og anvendelse af betonvarer i Danmark, som tager udgangspunkt i den historiske udvikling såvel som de teknologiske hovedpunkter. Afsnittet har bl.a. til formål at definere forskellen mellem almindelig blødstøbt- og jordfugtig beton samt de mest relevante betontechnologiske egenskaber for jordfugtig beton.