

Effekt fra økt herdetid på CO2-utslipp ved dimensjonering av etteroppspente huldekkeelementer

Effect of Increased Curing Time on CO2-Emissions in the Design of Post-tensioned Hollowcore Elements

Trondheim Mai 2023

Navn studenter:

Edgar Martin Andersen
Magnus Forbord

Intern veileder:
Arne Mathias Selberg

Eksterne veiledere:
Svein Ola Sognli
Eirik Nordvik

Prosjektnr:
2023 -03

Rapporten er ÅPEN



Fakultet for ingeniørvitenskap
Institut for konstruksjonsteknikk

Rapporten er ÅPEN

Problemdefinering/prosjektbeskrivelse og resultatmål

I dette prosjektet vil vi se på økning av herdetid for etteroppspente hulldekkeelementer, to, for å undersøke muligheter for tverrsnittsreduksjon og miljøfordeler forbundet med dette. For å svare på problemstillingen kommer vi til å ta for oss de 10 vanligste hulldekkeelementene samt alle tapskilder og ytterligere krav som inngår i dimensjoneringen.

For å systematisere, effektivisere og automatisere dimensjoneringsprosessen vil vi utføre alle beregninger i digitale programvarer som Python og AutoCad. Dette vil gjøre det mulig å sammenligne designvalg, dimensjoneringskriterier og -begrensinger mot alle aktuelle variabler og miljøpåvirkninger derav.

Gjennom prosjektet ønsker vi å få en bedre forståelse av detaljdimensjonering av etteroppspente hulldekker og miljøpåvirkning av ulike valg innenfor denne prosessen. Dette er gjort på et mest mulig generelt grunnlag for å kunne identifisere gjennomgående trender, og kan enkelt tilpasses etter spesifikke prosjekters behov og begrensinger.

Stikkord fra prosjektet:

- Herdetid
- Hulldekke
- CO2-utslipp
- Analyse
- Optimalisering
- Python

Forord

Rapporten begynte med å se på prosjektet Fornebuporten, med hensikt å forsøke å optimalisere dimensjoneringen som ble utført på dette bygget. Opprinnelig var planen å se overfladisk på flere bygningsdeler, men noen tidlige resultater på første bygningsdelen, hulldekker, viste en interessant trend.

Dette var at endringer av t_0 hadde en veldig markant effekt på tilgjengelige tverrsnitt ved dimensjonering mhp. nedbøyning. En herdetid $t_0 = 3$ er ofte forutsatt ved oppgaveberegninger, ettersom dette er industristandarden. Spørsmålet som dukket opp, var hva som ville skje dersom denne variabelen *ikke* ble satt etter denne standarden.

Rapportens problemstilling ble endret for å undersøke dette.

Vi ønsker å takke HENT AS og prosjektleder for prosjektering Svein Ola Sognli for tilgangen på tegninger, samt kontakten med underleverandøren av hulledekkerelementer Loe Betong v/Frank Hvidsten. Det var informasjon gitt i denne tidlige fasen som inspirerte grunnlaget til den endelige rapporten.

Videre ønsker vi å takke Institutt for Konstruksjonsteknikk, og spesielt universitetslektor og intern veileder Arne Mathias Selberg for gode råd og oppfølging gjennom hele prosessen. Vi lover å huske å levere tilbake alle bøkene vi lånte.

I tillegg ønsker vi å takke førsteamanuensis Daniel Cantero Lauer. Du hadde ikke noen offisiell rolle som veileder for oss, men var tilgjengelig likevel, og gav oss gode svar, på gjentatte forespørsler.

Trondheim, 22.05.2023:



Edgar Martin Andersen



Magnus Forbord

Sammendrag

Denne rapporten har sett på økning av herdetid for etteroppspente hulldekkeelementer, t_0 , for å undersøke muligheter for tverrsnittsreduksjon og potensielle miljøfordeler forbundet med dette, etter rapportens sentrale problemstilling:

Denne rapporten skal se på effekten av økninger på betongelementenes herdetid, t_0 , på optimaliseringer mhp. tverrsnittvalg, og følgende resulterende miljøpåvirkninger av en slik optimalisering.

Rapporten så på alle ti vanligste hulldekkeelementer, definert i Betongelementboka, for å besvare dette grundig. Videre ble alle tapskilder og langtidseffekter, samt brannkrav og egenresonansfrekvenskrav inkludert, for å sikre de mest realistiske resultater.

Hovedverktøyet gjennom hele prosessen var programmering i Python av alle relevante beregningsmodeller gitt i aktuelle standarder, hovedsakelig Eurokode 2, og Betongelementbøkene. Dette for å kunne enkelt se effekten av, og endre verdier og variabler for alle tverrsnitt parallelt.

Etter gjennomgang og analyser av alle relevante effekter, mhp. tverrsnittsoptimalisering, ble rapportens sentrale problemstilling håndtert. Verdier for CO₂-mengder pr. løpemeter ble satt opp, etter tverrsnitt og dekkespenn, både for industristandarden $t_0 = 3$ dager, og for alle t_0 fra 3 – 28 dager.

Resultatet ble en snitt reduksjon av CO₂-ekv. pr. løpemeter på 4.14%, over hele det definerte lengdespennet, 0 – 20.3m, mellom optimalt tverrsnitt for $t_0 = 3$ og for optimalt tverrsnitt for t_0 fra 3 – 28 dager.

Optimalt tverrsnitt ved $t_0 = 3$ dager ble påvist å være et større tverrsnitt enn hva beregninger kun mhp. nedbøyning krevde. Dette ble funnet å være pga. større forspenningskraft krevd for å holde mindre tverrsnitt innenfor nedbøyningskravene $0\text{mm} \leq \delta_{tot} \leq L/250$. Dette medførte krav til større armeringsmengde. Denne økningen av armeringsmengden resulterte i økte CO₂-ekv.-utslipp pr. løpemeter, på tross av besparelsen fra mindre sementbruk i mindre tverrsnitt.

Rapportens konklusjon er at økning av t_0 av miljøhensyn ikke nødvendigvis er en gunstig optimalisering grunnet vesentlige praktiske utfordringer. Økning av tverrsnittshøyden, for å redusere nødvendig armeringsmengde, blir heller ansett som det bedre alternativet.

Abstract

This report has evaluated the effects of increased curing time in the design of post-tensioned hollowcore elements, to investigate potential associated environmental benefits, in accordance with its central problem formulation:

This report will evaluate the effects of increased curing time, t_0 , with respect to optimization of hollowcore sections, and the following environmental effects of this optimization.

The report has considered all ten most common hollowcore elements, as defined in the Concrete Element Handbooks. Further, all sources of losses and long-term effects, as well as fire regulations and self-resonance frequency requirements have been included, to ensure realistic results.

The main tool throughout the process was programming in Python, of all relevant calculation models, mainly Eurocode 2 and the Concrete Element Handbooks. This was done to allow for ease of analyses and variable changes across all cross-sections in parallel.

After reviewing and analyzing all relevant effects regarding cross-sectional optimization, the central problem of the report was addressed. Values for CO₂-eqv. -amounts, based on cross-section and span, were set up for both the industrial standard $t_0 = 3$ days, and for every $t_0, 3 - 28$ days.

The result was an average reduction of CO₂ equivalent emissions of 4.14% over the entire defined span, 0 – 20.3m, between the optimal cross-section for $t_0 = 3$, and for the optimal cross-section for every t_0 .

The optimal cross-section for $t_0 = 3$ days was found to be larger than what was calculated for just the required deflection, due to the larger prestressing force required to support smaller cross-sections, which in turn required a greater amount of reinforcement. This reinforcement, and its subsequent environmental impact, increased CO₂-equivalent emissions more than the reduction from using less cement.

This report concludes that increasing curing time for environmental reasons is not necessarily a favorable optimization due to significant practical challenges. Meanwhile, increasing cross-sectional height to reduce the required amount of reinforcement is considered to be a good alternative.

Nomenklatur og definisjoner

| | |
|------------------|---|
| NS3491-1: | Prosjektering av konstruksjoner - Dimensjonerende laster - Del 1: Egenlaster og nyttelaster |
| EC0: | NS-EN 1990:2002+A1:2005+NA:2016 Eurokode 0: Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner |
| EC1: | Norsk Standard NS-EN 1991 Eurokode 1: Laster på konstruksjoner |
| EC2: | Norsk Standard NS-EN 1992-1-1:2004+A1+NA:2008 Eurokode 2: Prosjektering av betongkonstruksjoner - Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger |
| EC8: | Norsk Standard NS-EN 1998-1:2004+A1+NA Eurokode 8: Prosjektering av konstruksjoner for seismisk påvirkning Del 1: Allmenne regler, seismiske laster og regler for bygninger |
| CEN: | Comité européen de normalisation / Den europeiske standardiseringsorganisasjon |
| HD: | «Hulldekke», hvor HD420 tilsvarer et hulldekke med høyde lik 420mm |
| REI: | Brannmotstand. Hvor REI [min] tilsvarer en konstruksjonsdels som opprettholder sin bæreevne (R), integritet (E) og isolasjonsevne (I) i [min] minutter. |
| BKL: | Brannklasse. Finnes klasser fra 1-4 hvor det beskriver en bygnings konsekvens ved brann |
| B30: | Fasthetsklasse normalbetong (påstøp) |
| B45: | Fasthetsklasse normalbetong og tungbetong (hulldekker) |
| M45: | Bestandighetsklasse betong |
| X01: | Eksponeringsklasse betong |
| B500NC: | Standard kamstål |
| K257: | Standard armeringsnett |

Tegn- og Symbolforklaring

Store latinske

| | |
|---------------------|---|
| A | Areal |
| A_c | Ikke-transformert tverrsnittsareal |
| A_p | Armeringsmengde i tverrsnittet |
| A_s | Tverrsnittsareal av armering |
| $A_{s,min}$ | Tverrsnittsareal av minimumsarmering |
| A_t | Transformert tverrsnittsareal |
| $E_{cl}(t)$ | Elastisitetsmodul for enkeltlaster, som tar hensyn til lastpåføringstidspunkt |
| E_{cm} | Elastisitetsmodul for betong |
| $E_{cm}(t)$ | Elastisitetsmodul for betong etter 't' døgn |
| $E_{cm}(t_0)$ | Elastisitetsmodul for betong etter 't ₀ ' døgn |
| E_{dyn} | Dynamisk E-modul, for svingningsberegninger |
| E_{middel} | Elastisitetsmodul som tar hensyn til kryp |
| E_p | Dimensjonerende verdi for spennstålets elastisitetsmodul |
| K | Friksjonskoeffisient |
| L | Lengde |
| M | Bøyemoment, der subscript angir kilde/dimensjonerende/kapasitet/etc. |
| $M_{d,fi}$ | Dimensjonerende momentkapasitet v/start av brann |
| N | Aksialkraft |
| P | Forspenningskraft |
| $\Delta P_{\mu}(x)$ | Friksjonstap i avstand 'x' fra jekk |
| P_0 | Forspenningskraft uten tap |
| P_{Jekk} | Forspenningskraft uten tap |
| RH | Relativ luftfuktighet |
| S | Kapasitet, spennarmering |

Små latinske

| | |
|---------------|--|
| a | Armeringsdybde |
| a_{g40Hz} | Berggrunnens spektralakselerasjon v/40Hz, for jordskjelv m/returperiode 475 år, etter område |
| a_g | Dimensjonerende grunnakselerasjon |
| a_{gR} | Referansespissverdi for berggrunnens akselerasjon |
| b | Bredde |
| $c_{min,b}$ | Minste overdekning som følge av kravene til heft |
| d | Diameter/Tykkelse |
| d_{min} | Minimum diameter/tykkelse |
| e_p | Forspenningens eksentrisitet |
| f_{ck} | Betongens karakteristiske sylindertykkfasthet |
| f_{ckt} | Betongens karakteristiske aksialstrekkfasthet |
| $f_{ck}(t)$ | Betongens karakteristiske sylindertykkfasthet etter 't' døgn |
| $f_{ck}(t_0)$ | Betongens karakteristiske sylindertykkfasthet etter 't ₀ ' døgn |
| f_{cm} | Middelverdi av betongens sylindertykkfasthet |
| $f_{cm}(t)$ | Middelverdi av betongens sylindertykkfasthet etter 't' døgn |
| $f_{cm}(t_0)$ | Middelverdi av betongens sylindertykkfasthet etter 't ₀ ' døgn |
| f_{ctm} | Middelverdi av betongens strekkfasthet |
| $f_{d,fi}$ | Dimensjonerende strekkapasitet, spenntau, start av brann, temperatur $\theta = 20^{\circ}\text{C}$: |
| f_l | Egenfrekvensresonans |
| f_{pk} | Spennstålets karakteristiske strekkfasthet |
| $f_{p0.1k}$ | Spennstålets karakteristiske 0,1 %-strekkgrense |

| | |
|-----------|--|
| g | Gravitasjonskonstant |
| g_1 | Egenvekt |
| g_2 | Nyttelast |
| h | Høyde |
| h_0 | Effektiv tverrsnittstykkelse |
| h_{ekv} | Ekvivalent dekketykkelse ved branndimensjonering |
| I_y | Andre arealmoment |
| I_t | Andre arealmoment for transformert tverrsnitt |
| k | Reduksjonsfaktor ved spenningsberegninger, tilleggskrumning ved friksjonstapsberegninger |
| k_h | Koeffisient, avhengig av h_0 |
| q | Fordelt last, subscript angir kilde |
| s | Koeffisient, avhenger av sementtype |
| t | Tid i timer eller dager, spesifiseres |
| t_0 | Herdetid |
| y_t | Forflytning av tverrsnittets geometriske tyngdepunktsakse |
| z | Indre momentarm |
| z_c | Betongtverrsnittets tyngdepunkt |

Greske

| | |
|-------------------------------|---|
| α | Reduksjonsfaktor |
| $\beta_{cc}(t)$ | Reduksjonskoeffisient som avhenger av betongens alder 't' |
| $\beta_{cc}(t_0)$ | Reduksjonskoeffisient som avhenger av betongens herdetid 't ₀ ' |
| $\beta_{c(t,t_0)}$ | Reduksjonsfaktor mhp. betongens alder 't' og lastpåføringstidspunktet 't ₀ ' |
| $\beta_{ds(t,ts)}$ | Reduksjonsfaktor mhp. betongens alder, start på uttørkningssvinn og effektiv tykkelse |
| β_{fcm} | Reduksjonsfaktor for betongkvalitet |
| β_H | Reduksjonsfaktor mhp. relativ luftfuktighet |
| β_{t0} | Reduksjonsfaktor for lastpåføringstidspunkt |
| γ_c | Partialfaktor for betong |
| γ_s | Partialfaktor for stål |
| Δ | Endring |
| δ_{maks} | Maks nedbøyning |
| ε | Tøyning, der subscript angir område, årsak |
| η | Forholdstall mellom elastisitetsmodul til stål og betong |
| θ | Vinkelendring (friksjonsberegning), temperatur (brannberegning) |
| θ_0 | 350°C , etter $\mu_{fi} = 0.6$ |
| θ_{krit} | Temperatur, etter μ_{fi} |
| μ | Friksjonskoeffisient |
| μ_{fi} | Utnyttelse i ulykkesgrensetilstand brann |
| φ | Diameter armeringsjern |
| φ_0 | Normert kryptall |
| φ_{RH} | Faktor for relativ luftfuktighets effekt på kryp |
| $\varphi_{(\infty,t_0)}$ | Justeringsfaktor for kryp |
| $\sigma_c^{\theta,n}(\gamma)$ | Spenning i nedre fiber av betongen, subscript angir materiale, superscript angir posisjon |
| $\sigma_{p,maks}$ | Maks spenning i spennkabel |
| ψ_3 | Faktor for tilnærmet permanent verdi for en variabel påvirkning |

Tabelliste

| | |
|---|----|
| Tabell 1: Relevante verdier og definisjoner | 3 |
| Tabell 2: Tabell 2.1N - Materialfaktorer for bruddgrenetilstander (CEN, 2020) | 6 |
| Tabell 3: Tabell A 4.2. Vekter og anbefalte maks spennvidder for hulldekker (Betongelementforeningen, 2010) | 7 |
| Tabell 4: Table 2 - Dimensions and properties of strands (Cantero, Forelesning L3, 2022) | 13 |
| Tabell 5: Tabell 3.3 - Verdier for k_h i uttrykk (3.9) (CEN, 2017) | 29 |
| Tabell 6: Tabell 43 i Sintef Byggforsk. Bærende bygningsdelers brannmotstand (Sintef Byggforsk, 2017) | 52 |
| Tabell 7: Betongs brannmotstandsklasser (Betongelementforeningen, 2018) | 53 |
| Tabell 8: Tabell D 4.1 fra Betongelementboken (Betongelementforeningen, 2017)..... | 53 |
| Tabell 9: C 1.10. Resonansfrekvenser for typiske hulldekker [Hz] (Betongelementboken, 2020) | 59 |
| Tabell 10: Hvert hulldekkes lengste spenn og tilhørende kg-CO ₂ -ekv sammenlignet med et optimalisert hulldekke (Eget arbeid, 2023) | 70 |
| Tabell 11: Hvert hulldekkes lengste spenn og tilhørende kg-CO ₂ -ekv sammenlignet med et optimalisert hulldekke for alle mulige verdier for t_0 (Eget arbeid, 2023) | 72 |
| Tabell 12: Gjennomsnittlig CO ₂ -besparelse for dekker 5.0 - 20.3m (Eget arbeid, 2023) | 73 |
| Tabell 13: Gjennomsnittlig CO ₂ -besparelse for dekker 15.8 - 20.3m (Eget arbeid, 2023) | 73 |
| Tabell 14: Pythonutskrift over et utvalg lengder med $t_0 = 3$ sammenlignet med optimal t_0 (Eget arbeid, 2023) | 74 |
| Tabell 15: Utskrift fra python med verdier for dekkelengder 17.2m (Eget arbeid, 2023) | 76 |

Figurliste

| | |
|--|----|
| Figur 1: Arbeidsdiagram for betong (Cantero, Forelesning L3, 2022) | 4 |
| Figur 2: Arbeidsdiagram for spennstål (EC2, 3.3.3, 2017) | 5 |
| Figur 3: Skisse av betongdekkene belastet av g_1 og g_2 over spenn L [m] (Eget arbeid, 2023) | 6 |
| Figur 4: Virkning av en jevnt fordelt last på en bjelke fra Sintef Byggforsk (Sintef, 2019) | 6 |
| Figur 5: Forspenningsprofil ved jevnt fordelt last (Cantero, BYGT2320 Betongkonstruksjoner 2 Formelark, 2022) | 7 |
| Figur 6: Skisse av tverrsnitt (Eget arbeid, 2023) | 8 |
| Figur 7: Skisse av tverrsnitt med forenklet geometrisk inndeling (Eget arbeid, 2023) | 9 |
| Figur 8: Tegning av HD500 gjort i AutoCAD (Eget arbeid, 2023) | 9 |
| Figur 9: 7-vaierkabel (Mazella & Eget arbeid, 2023) | 13 |
| Figur 10: Armeringsplassering i tverrsnitt (Eget arbeid, 2023) | 14 |
| Figur 11: Generell parabolisk forspenning (Cantero, 2022) | 15 |
| Figur 12: Tapskilder i spennarmert betong (Cantero, Forelesning L9, 2022) | 19 |
| Figur 13: Detailed member design - Draw in losses (Eugene Obrien, 2012) | 20 |
| Figur 14: Skisse som viser hvordan friksjonstap oppstår i en bjelke (Cantero, Forelesning L9, 2022) ... | 21 |
| Figur 15: Detailed member design - Friction losses (Eugene Obrien, 2012) | 22 |
| Figur 16: Spenning i tverrsnitt ved overføring ved $t_0 = 3$ (Eget arbeid, 2023) | 36 |
| Figur 17: Spenning i øvre og nedre fiber ved $t_0 = 3$ (Eget arbeid, 2023) | 37 |
| Figur 18: Totalt tap i forspenning ved $t_0 = 3$ (Eget arbeid, 2023) | 38 |
| Figur 19: Totalt tap i forspenning ved $t_0 = 3$ og $A_p = A_{s,min}$ (Eget arbeid, 2023) | 39 |
| Figur 20: Totalt tap avhengig av t_0 ved L = 9.9m (Eget arbeid, 2023) | 40 |
| Figur 21: Låsetap avhengig av lengde på hulldekke ved $t_0 = 3$ (Eget arbeid, 2023) | 42 |

| | |
|---|----|
| Figur 22: Friksjonstap avhengig av lengde på hulldekke ved $t_0 = 3$ (Eget arbeid, 2023)..... | 43 |
| Figur 23: Tap pga kryp avhengig av lengde på hulldekke ved $t_0 = 3$ (Eget arbeid, 2023)..... | 44 |
| Figur 24: Tap pga kryp avhengig av lengde på hulldekke ved $t_0 = 3$ og $A_p = A_{s_min}$ (Eget arbeid, 2023) | 45 |
| Figur 25: Tap pga kryp avhengig av t_0 ved $L = 9.9$ (Eget arbeid, 2023) | 46 |
| Figur 26: Svinntap avhengig av lengde på hulldekke ved $t_0 = 3$ (Eget arbeid, 2023) | 46 |
| Figur 27: Svinntap avhengig av lengde på hulldekke ved $t_0 = 3$ og $A_p = A_{s_min}$ (Eget arbeid, 2023) ... | 47 |
| Figur 28: Tap pga relaksasjon avhengig av lengde ved $t_0 = 3$ (Eget arbeid, 2023)..... | 48 |
| Figur 29: Tap pga relaksasjon avhengig av lengde ved $t_0 = 3$ og $A_p = A_{s_min}$ (Eget arbeid, 2023) | 49 |
| Figur 30: Langtidsnedbøyning avhengig av dekkelengde ved $t_0 = 3$ & $t_0 = 28$ (Eget arbeid, 2023) | 50 |
| Figur 31: Langtidsnedbøyning avhengig av dekkelengde ved $t_0 = 3$, forstørret (Eget arbeid, 2023) | 51 |
| Figur 32: Langtidsnedbøyning avhengig av t_0 ved $L = 14.4m$ (Eget arbeid, 2023)..... | 51 |
| Figur 33: D 3.1 Armeringsdybde til senter av hovedarmering (Betongelementforeningen, 2017) | 54 |
| Figur 34: D 3.2 fra Betongelementboken (Betongelementforeningen, 2017) | 56 |
| Figur 35: REI avhengig av lengde ved $t_0 = 3$ (Eget arbeid, 2023) | 57 |
| Figur 36: REI avhengig av lengde ved $t_0 = 28$ (Eget arbeid, 2023) | 58 |
| Figur 37: Skisse av HD400 m/påstøp (Eget arbeid, 2023) | 60 |
| Figur 38: Frekvens avhengig av dekkelengde ved $t_0 = 3$ & $t_0 = 28$ | 61 |
| Figur 39: Frekvens avhengig av dekkelengde ved $t_0 = 3$ & $t_0 = 28$, 50mm påstøp (Eget arbeid, 2023) | 61 |
| Figur 40: Nedbøyning avhengig av dekkelengde ved $t_0 = 3$ (Eget arbeid, 2023)..... | 63 |
| Figur 41: Nedbøyning avhengig av dekkelengde ved $t_0 = 28$ (Eget arbeid, 2023)..... | 64 |
| Figur 42: Skisse av tverrsnitt på 3, 7 og 19-vaierkabel (Eget arbeid, 2023) | 65 |
| Figur 43: Armeringsmengde avhengig av armeringstype (Eget arbeid, 2023) | 65 |
| Figur 44: REI avhengig av lengde ved $t_0 = 3$ (Eget arbeid, 2023) | 66 |
| Figur 45: REI avhengig av lengde ved $t_0 = 3$, oppdatert C_{min_b} (Eget arbeid, 2023)..... | 67 |
| Figur 46: CO ₂ -utslipp avhengig av L ved $t_0 = 3$ (Eget arbeid, 2023) | 69 |
| Figur 47: CO ₂ -utslipp avhengig av L ved $t_0 = 3$, optimal | 71 |
| Figur 48: CO ₂ -utslipp avhengig av L , $t_0 = 3$ & $t_0 = 28$ (Eget arbeid, 2023) | 72 |
| Figur 49: Nedbøyning avhengig av t_0 - HD420 (Eget arbeid, 2023) | 75 |
| Figur 50: CO ₂ -utslipp avhengig av L , Sammenligning av HD420, $t_0 = 3$ optimal, og alle t_0 optimal (Eget arbeid, 2023) | 75 |

Innholdsfortegnelse

| | |
|--|-----|
| Problemdefinering/prosjektbeskrivelse og resultatmål | i |
| Forord | i |
| Sammendrag | ii |
| Abstract | iii |
| Nomenklatur og definisjoner..... | v |
| Tegn- og Symbolforklaring..... | vi |
| Store latinske | vi |
| Små latinske..... | vi |
| Greske..... | vii |
| Tabelliste | vii |
| Figurliste | vii |
| Innholdsfortegnelse | ix |
| Innledning..... | 1 |
| Leserguide | 1 |
| Rapportens inndeling | 1 |
| 1.1 Antagelser og avgrensninger..... | 3 |
| 1.1.1 Skjærkrefter | 3 |
| 1.2 Materialer | 3 |
| 1.2.1 Betong..... | 4 |
| 1.2.2 Spennstål | 4 |
| 1.3 Konstruksjonsdetaljer..... | 5 |
| 1.3.1 Statikk | 5 |
| 1.3.2 Forspenning | 6 |
| 1.3.3 Laster | 7 |
| 1.3.3.1 Maks moment | 8 |
| 1.4 Tverrsnitt..... | 8 |
| 1.4.1 Transformert tverrsnitt | 9 |
| 1.4.1.1 For korttidsspenningsfordeling (ved overføring): | 10 |
| 1.4.1.2 For langtidsspenningsfordeling med hensyn på kryp: | 11 |
| 1.5 Forspenningskraft P..... | 12 |
| 1.6 Armeringsmengde i tverrsnittet..... | 12 |
| 1.6.1 Litt om kabeltype..... | 14 |
| 1.6.2 Armeringsplassering | 14 |

| | |
|--|----|
| 1.7 Eksentrisitet og overdekning | 14 |
| 1.7.1 Laster fra forspenningskraft | 16 |
| 1.7.1.1 Spenninger i endefiber | 17 |
| 1.7.1.2 Spenninger i midtpunkt | 17 |
| 1.7.1.3 Maks spenninger i tverrsnitt | 18 |
| 1.7.2 Setter ny P | 18 |
| 1.8 Tapskilder i spennarmert betong | 19 |
| 1.8.1 Umiddelbare tap | 20 |
| 1.8.1.1 Låsetap | 20 |
| 1.8.1.2 Friksjonstap | 21 |
| 1.8.1.3 Temperaturtap | 22 |
| 1.8.1.4 Elastiske deformasjonstap | 22 |
| 1.8.2 Tidsavhengige tap | 23 |
| 1.8.2.1 Forspenningskraft ved langtidsberegninger | 23 |
| 1.8.3 Kryp og midlere E-modul | 23 |
| 1.8.3.1 Aktuelle laster | 25 |
| 1.8.3.2 Effekten av kryp på forspenningskraft | 26 |
| 1.8.3.3 Effekten av kryp på spenningsfordeling i tverrsnittet | 27 |
| 1.8.4 Svinn | 28 |
| 1.8.4.1 Effekten av svinn på forspenningskraften | 29 |
| 1.8.4.2 Effekten av svinn på spenningsfordeling i tverrsnittet | 30 |
| 1.8.5 Relaksasjon | 30 |
| 1.8.5.1 Effekten av relaksasjon på spenningsfordeling i tverrsnittet | 32 |
| 1.8.6 Andre tapskilder | 32 |
| 1.9 Langtids spenningsfordeling | 32 |
| 1.10 Nedbøyningsberegninger | 33 |
| 2.1 Analyse | 35 |
| 2.1.1 Litt om formatet på grafene | 35 |
| 2.2 Spenningsanalyse | 35 |
| 2.2.1 Spenninger ved overføring | 36 |
| 2.2.2 Langtidsspenning | 37 |
| 2.2.3 Konklusjon av spenningsanalyse | 37 |
| 2.3 Tapsanalyse | 37 |
| 2.3.1 Total tap mot L | 38 |
| 2.3.1.1 Total tap mot L idealisert | 39 |
| 2.3.1.2 Total tap mot t_0 | 40 |

| | |
|---|----|
| 2.3.2 Umiddelbare tap | 41 |
| 2.3.2.1 Låsetap mot L | 41 |
| 2.3.2.2 Friksjonstap mot L..... | 43 |
| 2.3.3 Langtidstap..... | 43 |
| 2.3.3.1 Kryptap mot L | 44 |
| 2.3.3.2 Kryptap mot t_0 | 46 |
| 2.3.3.3 Svinntap mot L..... | 46 |
| 2.3.3.4 Relaksasjonstap mot L..... | 48 |
| 2.3.4 Konklusjon av tapsanalyse | 49 |
| 2.4 Nedbøyningsanalyse | 49 |
| 2.4.1 Nedbøyningsårsaker | 49 |
| 2.4.2 Litt om grafene i nedbøyningsanalysen | 50 |
| 2.4.3 Nedbøyning mot L avhengig av t_0 | 50 |
| 2.4.4 Nedbøyning mot t_0 avhengig av L | 51 |
| 2.5 Ytterligere krav | 52 |
| 2.5.1 Brann | 52 |
| 2.5.1.1 Materialklasser ved brann..... | 53 |
| 2.5.1.2 Brannmotstand i hulldekker | 53 |
| 2.5.1.3 Justert brannmotstand i dekker | 54 |
| 2.5.1.4 Kontroll av brannkrav mot L | 57 |
| 2.5.1.5 Konklusjon brann | 58 |
| 2.5.2 Vibrasjon og resonans | 59 |
| 2.5.2.1 Fastsetting av laveste resonansfrekvens | 60 |
| 2.5.2.2 Visualiseringer av laveste resonansfrekvens | 61 |
| 2.5.2.3 Konklusjon vibrasjon og resonans | 62 |
| 2.5.3 Isolasjon, varme og lyd | 62 |
| 2.5.4 Jordskjelv | 62 |
| 3.1 Optimalisering..... | 63 |
| 3.1.1 Spenninger i tverrsnitt | 64 |
| 3.1.2 Optimalisering av betong..... | 65 |
| 3.1.3 Optimalisering av armeringsmengde | 65 |
| 3.1.4 Påvirkninger mot tidligere funn | 66 |
| 3.1.4.1 Brannkrav | 66 |
| 3.1.4.2 Vibrasjon og resonans..... | 68 |
| 3.2 Miljøpåvirkning | 68 |
| 3.2.1 Sement..... | 68 |

| | |
|--|----|
| 3.2.2 Spennstål | 68 |
| 3.3 Resultater | 69 |
| 3.3.1 CO2-utslipp mhp. t_0 | 71 |
| 3.3.2 Eksempel | 74 |
| 3.3.3 Konklusjon eksempel | 76 |
| 3.4 Praktiske utfordringer | 77 |
| 3.5 Konklusjon | 77 |
| 3.6 Videre arbeid | 77 |
| 3.6.1 Andre miljøfaktorer | 78 |
| 3.6.1.1 Transport | 78 |
| 3.6.1.2 Landbruk | 78 |
| 3.6.1.3 Vannforbruk | 78 |
| 3.6.1.4 Reduksjon av forspenningskraft | 78 |
| 3.6.1.5 Forskjellig resirkuleringsgrad | 78 |
| 3.6.2 Andre dimensjoneringskriterier | 78 |
| 3.6.2.1 Skjærkrefter | 78 |
| 3.6.2.2 Snølast og vindlast | 78 |
| 3.6.2.3 Tilsetningsstoffer i betong | 79 |
| 3.6.2.4 Fiberarmering | 79 |
| 3.6.2.5 Konstruktive detaljer | 79 |
| 3.7 Feilkilder | 79 |
| 3.7.1 Programmering i Python | 79 |
| 3.7.2 AutoCAD og tegning av tverrsnitt | 79 |
| 3.7.3 Menneskelige feil | 80 |
| 3.7.4 Feilaktig informasjon | 80 |
| 4.1 Referanser | 81 |
| 4.2 Vedlegg | 85 |

Innledning

I disse tider med grønt skifte må mange vurderinger tas for å finne optimale løsninger for å ivareta miljøhensyn i bransjen. Betong er verdens mest brukte byggemateriale, med ca. 4.2 milliarder tonn sement produsert pr. år (Statista, 2023). Sement er kjent som et svært forurensende materiale.

Hulldekkeelements herdetid i produksjon, t_0 , er som en industristandard satt til $t_0 = 3$ dager. Dette kommer av at 3 dager er korteste herdetid, ihht. dimensjonering med EC2, som de vanligste beregningsmetodene tillater. Det er imidlertid kjent at lengre herdetid er bedre. Betong oppnår tilnærmet full styrke først etter $t_0 = 28$ dager.

Dette fører til rapportens sentrale problemstilling:

Denne rapporten skal se på effekten av økninger på betongelementenes herdetid, t_0 , på optimaliseringer mhp. tverrsnittvalg, og følgende resulterende miljøpåvirkninger av en slik optimalisering.

Med høyere styrke, vil reduksjoner av tverrsnittshøyden være mulig. Dette vil medføre mindre sementbruk pr. løpemeter hulldekke, og kan på denne måten gi en miljøgevinst.

Rapporten kommer til å se på alle relevante effekter som inngår i hulldekkedimensjonering, for å kunne besvare problemstillingen best mulig.

Leserguide

Rapporten benyttet programmering i Python som verktøy til alle analyser. Dette programmet ble skrevet underveis, og utviklet seg ilt. arbeidet. Et spørsmål som dukket opp ifb. dette var om rapporten skulle inkludere denne arbeidsprosessen, eller kun vise sluttresultatene av den.

Det endelige resultatet endte med å bli en kombinasjon, der den grunnleggende kodingen er beskrevet etter dimensjoneringsgrunnlaget, mens videre endringer blir beskrevet etter hvert som de blir relevant. Dette er gjort for å sikre forståelse hos leser for hvilke metoder og antagelser rapporten har brukt.

Rapportens inndeling

Rapportens første del er en presentasjon av antagelser, materialer brukt, statikk, laster o.l. som er relevant for rapporten. Videre beskrives prosedyren for kodingen, med henvisninger til EC2 og andre dimensjoneringsgrunnlag brukt, samt litt om metodene til selve kodingen.

Rapportens andre del er bruk av denne koden. Dette inkluderer kontroller mot toleransegrenser, for å sikre at alt er definert riktig. Videre følger visualiseringer og utskrifter av effekter, med hensikt å analysere og drøfte optimaliseringsmuligheter.

Rapportens tredje og avsluttende del er hovedresultatene ihht. rapportens sentrale problemstilling, analyse og drøfting vedrørende dette, samt konklusjonen av rapportens funn.

Til slutt inkluderes det muligheter for videre arbeid, drøfting av feilkilder, referanseliste, vedlegg, etc.

1.1 Antagelser og avgrensninger

For å kunne utføre de nødvendige kalkulasjonene må en del verdier tilknyttet sine respektive områder defineres. Disse er beskrevet i tabellen under:

| Område | Antagelse | Årsak/forklaring |
|---|--------------------------------|---|
| Betongtype | B45, M45 | Industristandard |
| Sementklasse | R | Industristandard |
| Relaksasjonsklasse | 2 | EC2, 3.3.2 (4)P |
| Bruksområde på bygg | Kontorbygg, under 5 etasjer | Fastsettelse av nyttebelast, m.m. |
| Herdetid t_0 | 3 – 28 dager | Ihht. rapporten problemstilling |
| Lastpåføringstidspunkt egenvekt | 28 dager | For overføring alltid \geq maks t_0 |
| Lastpåføringstidspunkt konstruktiv påstøp | 60 dager | Antagelse |
| f_{pk} | 1700 MPa | Vanlig verdi |
| f_{p01k} | 1550 MPa | Vanlig verdi |
| $\Delta L_{lås}$ | 5 mm | Vanlig verdi |
| K | 0.005 m^{-1} | Konservativ verdi |
| μ | 0.19 | EC2, 5.10.5.2 (3) tabell 5.1 |
| $\sigma_{p.maks}$ | 1472.5 MPa | EC2, 5.10.2.1 (2) |
| Armeringskabeltype | 3-vaiere, 7 vaiere, 19 vaiere | Vanligste typer (ASTM, 2013) |
| RH | 40 % | EC2, 3.1.4 (5) |
| Brannreaksjoner | A1, s1, d0 | Etter Betongelementboka D1 |
| Påstøp | Armert, konstruktiv påstøp | Vibrasjonsdimensjonering |
| Dynamisk E-modul | $E_{dyn} = 1.175 \cdot E_{cm}$ | Ligger mellom 15 – 20 % |
| Lokasjon | Osloområdet | For områdeseismisitet v/jordskjelvberegninger |

Tabell 1: Relevante verdier og definisjoner

Nærmere beskrivelse og begrunnelser av antagelsene kommer i rapporten etter hvert som de blir relevant.

1.1.1 Skjærkrefter

Skjærkrefter er vanligvis ikke dimensjonerende for hulldekkeelementer. De er først dimensjonerende ved høyere laster på kortere spenn (Betongelementforeningen, 2010). Hulldekkeelementer benytter heller vanligvis ikke skjærarmering (Cantero, Forelesning L18, 2022).

Rapporten vil derfor ikke se på skjærkrefter.

1.2 Materialer

Det er to materialer omhandlet i denne rapporten. Betong og spennstål.

1.2.1 Betong

Betongkvalitet er antatt å være B45, M45 ettersom dette er en industristandard i prefabrikkerte betongelementer (Betongelementforeningen). Dette medfører disse verdiene for betongen, hentet fra EC2 tabell 3.1:

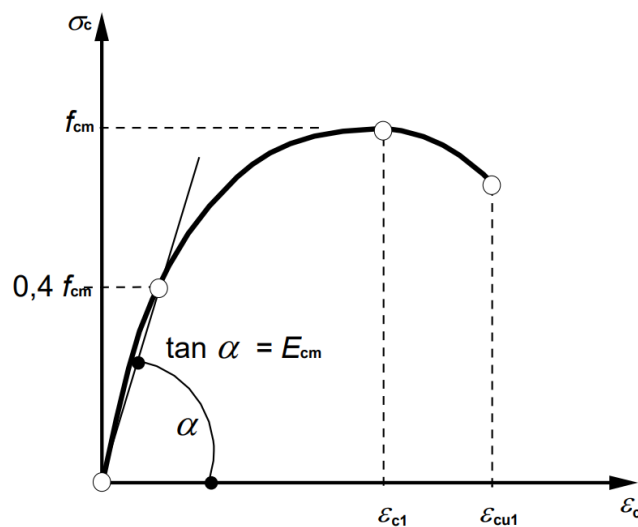
$$f_{ck} = 45MPa$$

$$f_{cm} = 53Mpa$$

$$f_{ctm} = 3.8MPa$$

$$E_{cm} = 36000MPa$$

Betong brukt i prefabrikkerte elementer har også et lavere sement – vann forhold, altså den er tørrere. Dette er for å sikre mot korrosjon av stålet.



Figur 1: Arbeidsdiagram for betong (Cantero, Forelesning L3, 2022)

Grafen over viser vanlig arbeidsdiagram for betong, sammenhengen mellom spenning σ_c over tøyning ϵ_c . Punktet på toppen av kurven ved maks σ_c er punktet der $\sigma_c = f_{cm}$. Der grafen slutter, ved ϵ_{cu1} , er betongens bruddpunkt. Et punkt som ikke vises på denne grafen, er punktet der $\sigma_c = f_{ck}$. Den er definert som:

$$f_{ck} = f_{cm} - 8Mpa$$

1.2.2 Spennstål

Spennstål er ca. 3 ganger sterkere enn vanlig armeringsstål B500NC. Vanligst brukte spennstålet har relaksasjonsklasse 2. Verdiene som blir aktuelle i denne rapporten er:

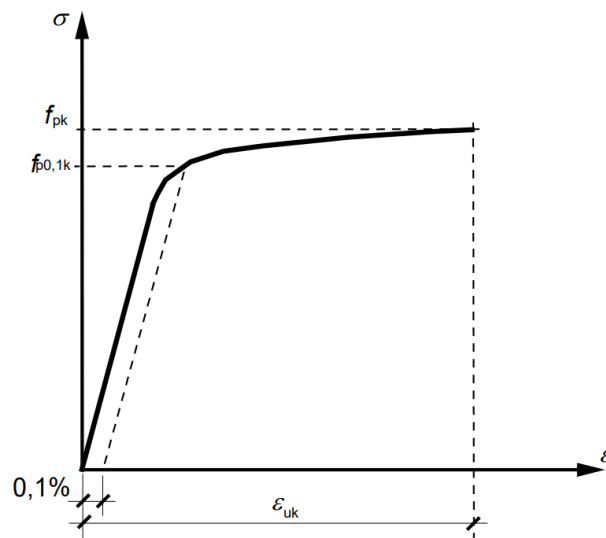
$$f_{pk} = 1700MPa$$

$$f_{p0.1k} = 1550MPa$$

$$E_p = 195000MPa$$

(Cantero, Forelesning L3, 2022)

Grafen under er spennstålets arbeidsdiagram hentet fra EC2, 3.3.3:



Figur 2: Arbeidsdiagram for spennstål (EC2, 3.3.3, 2017)

Grafen viser området hvor f_{pk} og $f_{p0.1k}$ kommer fra som er hhv. karakteristisk største belastning i aksialtrekk, og karakteristisk 0.1% strekkgrense for spennstål. Disse verdiene kan ikke finnes ved beregning. De finnes fra forsøk, og er oppgitt av leverandør. Antar for denne rapporten verdiene:

$$f_{pk} = 1700MPa$$

$$f_{p0.1k} = 1550MPa$$

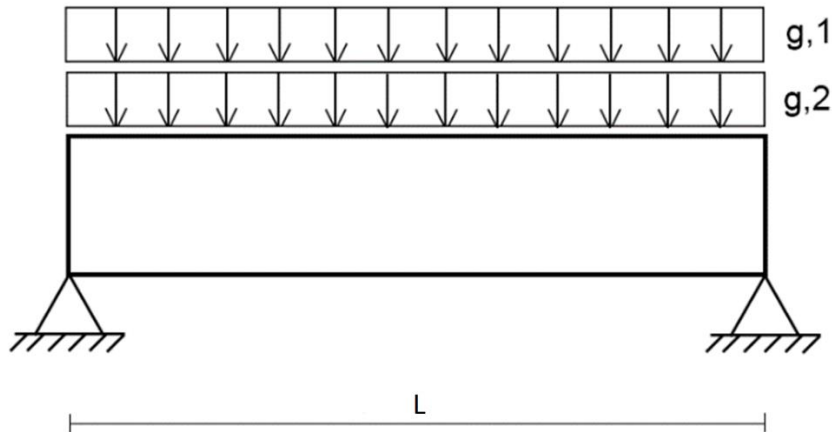
1.3 Konstruksjonsdetaljer

Denne rapporten begynte med å se på prosjektet Fornebuporten, og dimensjoneringen som var utført der. På dette prosjektet finnes det et konstruktivt påstøp. Hensikten med denne ble funnet til å være å gi dekkene en tilfredsstillende egenfrekvens for vibrasjonsdimensjonering.

Dette konstruktive påstøpet ble bestemt å være med i alle beregningene for å sikre god dimensjonering mot uønskede vibrasjoner i dekkene, mer om dette i 2.5.2 *Vibrasjon og resonans*.

1.3.1 Statikk

Betongdekkene denne rapporten skal undersøke er fritt opplagte. De ytre lastene elementene er belastet med er summen av egenlast, som består av last fra elementet og påstøpet, og nyttelast. Denne kan modelleres som en jevnt fordelt last q_{Ed} over bjelkespennet.



Figur 3: Skisse av betongdekkene belastet av g_1 og g_2 over spenn L [m] (Eget arbeid, 2023)

$$q_{Ed} = 1.2 \cdot (g_{1.1} + g_{1.2}) + 1.5 \cdot g_2$$

Egenlastene og nyttebelastningen er økt med en sikkerhetsfaktor på hhv. 1.2 og 1.5 etter EC2 – Tabell 2.1N:

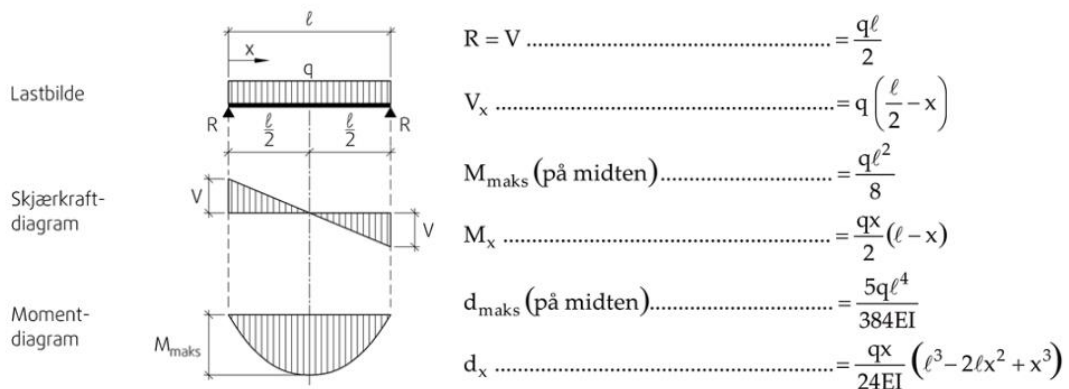
Tabell 2.1N – Materialfaktorer for bruddgrensetilstander

| Dimensjonerende situasjoner | γ_c for betong | γ_s for armeringsstål | γ_s for spennstål |
|-----------------------------|-----------------------|------------------------------|--------------------------|
| Vedvarende og forbigående | 1,5 | 1,15 | 1,15 |
| Ulykkesituasjon | 1,2 | 1,0 | 1,0 |

Tabell 2: Tabell 2.1N - Materialfaktorer for bruddgrensetilstander (CEN, 2020)

Aktuelle sammenhenger for en fritt opplagt bjelke i denne rapporten, hentet fra Sintef Byggforsk:

21 Jevnt fordelt last

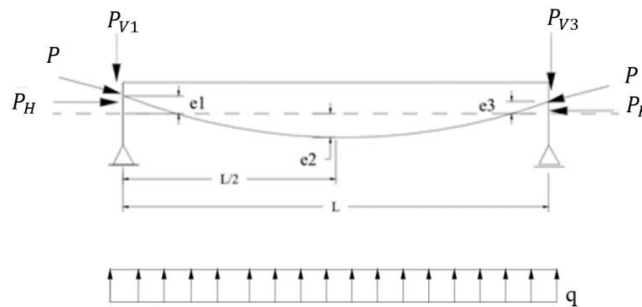


Figur 4: Virkning av en jevnt fordelt last på en bjelke fra Sintef Byggforsk (Sintef, 2019)

1.3.2 Forspenning

Målet med forspenning er å skape en indre last som motvirker de ytre lastene på konstruksjonen. Det kan påvises at dette skjer når forspenningens geometri følger geometrien til momentet fra de ytre lastene. I dette tilfellet parabolisk etter en fritt opplagt bjelke. Se figur over for momentdiagram.

Figuren under viser nødvendig forspenningsprofil for å motvirke en jevnt fordelt last over en fritt opplagt bjelke. Nederst på figuren vises den fordelte lasten skapt av forspenning q .



Figur 5: Forspenningsprofil ved jevnt fordelt last (Cantero, BYGT2320 Betongkonstruksjoner 2 Formelark, 2022)

Nærmere utledning av faktorene her kommer etter hvert som det blir relevant.

1.3.3 Laster

Bjerkene belastes av jevnt fordelt last q_{Ed} . Denne består av bidragene fra egenlast g_1 og nyttelast g_2 . I denne rapporten behandles 50% av nyttelasten som permanent.

Egenlasten g_1 består av lasten fra hulldekket $g_{1.1}$ og lasten fra påstøpet $g_{1.2}$. Verdiene av disse avhenger av valgt HD element. Se tabell for HD elementer brukt i rapporten.

| Elementtype B / H | Egenvekt av fuget dekke, kN/m ² | Maks. anbefalt spenn- vidde, m |
|----------------------|---|-----------------------------------|
| 1200 / 200 | 2,6 | 10 |
| 1200 / 220 | 3,1 | 10 |
| 1200 / 265 | 3,7 | 13 |
| 1200 / 285 | 4,2 | 13 |
| 1200 / 320 | 4,2 | 15 |
| 1200 / 340 | 4,7 | 15 |
| 1200 / 400 | 5,0 | 17 |
| 1200 / 420 | 5,5 | 17 |
| 1200 / 500 | 6,8 | 19 |
| 1200 / 520 | 7,3 | 19 |

Tabell 3: Tabell A 4.2. Vekter og anbefalte maks spennvidder for hulldekker (Betongelementforeningen, 2010)

Hulldekke HDXXX og påstøp B30 m/tykkelse 130mm, armert i senter m/armeringsnett 2 K257 B500NA gir $g_{1.1}$ og $g_{1.2}$ lik:

$$g_{1.1} = B_{HD} \cdot \gamma_{c,HDXXX}$$

$$g_{1.2} = B_{HD} \cdot \gamma_c \cdot h_{p\text{åstøpt}}$$

Enhetene for $\gamma_{c,HDXXX}$ er [kN/m²] og γ_c er i [kN/m³]. Dermed blir enhetene for $g_{1.1}$ og $g_{1.2}$ [kN/m].

Nyttelast g_2 består av lasten fra all innredning, mennesker og utstyr som vil benyttes i bygget. Benytter verdiene oppgitt i NS3491-1:

$$g_2 = 3.0 \frac{kN}{m^2} \cdot 1.0m = 3.0 \frac{kN}{m}$$

Verdiene for g_1 og g_2 ganges så sammen med hver sin sikkerhetsfaktor og summeres for å finne endelig verdi q_{Ed} som blir dimensjonerende for betongelementene. Benytter sikkerhetsfaktor $\gamma_{g1} = 1.2$ for egenlasten og $\gamma_{g2} = 1.5$ for nyttelasten (CEN, 2004). Dermed kan q_{Ed} uttrykkes som:

$$q_{Ed} = \gamma_{g1} \cdot g_1 + \gamma_{g2} \cdot g_2 = 1.2 \cdot g_1 + 1.5 \cdot g_2$$

For å ta høyde for forskjellige tverrsnitt er all tverrsnittsdata lagt til i lister i Python. Den henter så fra listen når den trenger en variabel. For disse blir koden:

```
g1_1 = 1.2 * Dekker[dekke]["g1"]
g1_2 = 1.2 * 0.13 * 27
g2 = 3
```

Utdrag fra vedlegg 3: Pythonkode

Her henter koden relevant data fra listen over tverrsnittsdata etter hvilket tverrsnitt som blir undersøkt. Dette sikrer riktige verdier av denne lasten i alle videre beregninger.

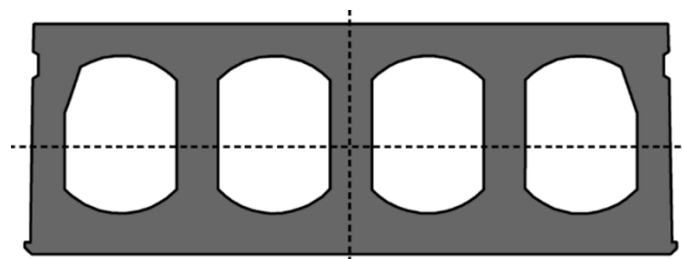
1.3.3.1 Maks moment

Betongelementene er fritt opplagte. Dette medfører at maks (dimensjonerende) moment på bjelken, hentet tidligere fra Sintef og omskrevet med rapportens variabler, kan uttrykkes som:

$$M_{Ed} = \frac{q_{Ed} \cdot L^2}{8}$$

1.4 Tverrsnitt

Tverrsnittsdataen til HD elementer er komplisert å regne ut nøyaktig. Arealet kan tilnærmes med arealet av hele tverrsnittet, $b \cdot h$, minus arealet av hullene. For mindre tverrsnitt, HD340 og nedover, er dette en grei tilnærming ettersom hullene er runde. For tverrsnitt større enn dette blir hullene mer ovale. Det er også en ekstra leppe og innsnevring i siden i hhv. under- og toppkant, i alle dimensjonene. I tillegg til dette er sidene ikke helt rette. Bredden i topp er noe kortere enn bredden i bunn for å få plass til fuging under montering. Se figur for eksempel:

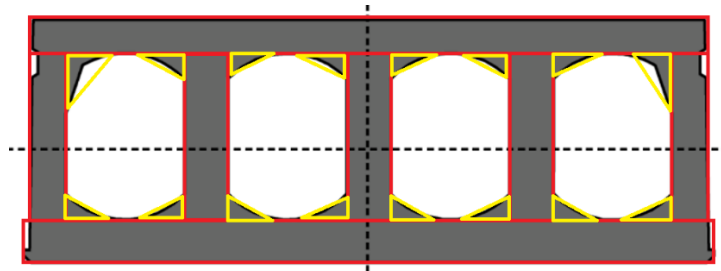


Figur 6: Skisse av tverrsnitt (Eget arbeid, 2023)

Deretter må geometrisk senter, z_c , regnes ut. Dette er det området der arealet er det samme over og under sentralaksen gjennom punktet. Det kan regnes ut som:

$$z_c = \frac{\sum z_{c_i} \cdot A_i}{\sum A_i}$$

Der A_i er areal av aktuell del av tverrsnittet og $z_{c,i}$ er avstand dette arealet har fra lokal x-akse, plassert nederst i tverrsnittet. Bjelkens arealsenter kunne blitt tilnærmet ved å dele inn tverrsnittet slikt:

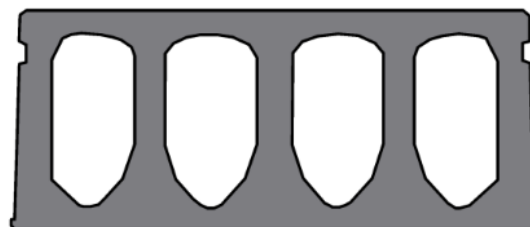


Figur 7: Skisse av tverrsnitt med forenklet geometrisk inndeling (Eget arbeid, 2023)

Det er lett å se at dette er komplisert, og gir kun et tilnærmet resultat. Videre må tverrsnittets andre arealmoment, I_y , regnes ut. Dette kompliserer prosessen ytterligere. Siden dette er et tverrsnitt bestående av flere deler, blir I_y her summen av alle delenes andre arealmoment med hvert sitt Steiner-tillegg etter avstand fra sentralaksen z_c . Dette kan uttrykkes matematisk slik:

$$I_{y,HDXXX} = \sum \left(\frac{b_i \cdot h_i^3}{12} + d z_{c,i}^2 \cdot A_i \right)$$

For å unngå unøyaktige resultater fra alle disse tilnærmingene er alle 10 HD elementer undersøkt i denne rapporten modellert i AutoCAD. Denne applikasjonens tverrsnittstegner inneholder verktøy for å regne ut disse verdiene nøyaktig, og er mye raskere enn metodene for håndberegning beskrevet over. Se figur under for eksempelvis tverrsnitt HD500:



HD 500
Area: 305202.6371
zc: 236.7968
iy: 9078620985.1807

Figur 8: Tegning av HD500 gjort i AutoCAD (Eget arbeid, 2023)

Enhet for tallene er hhv. [mm²], [mm] og [mm⁴] for areal, z_c og I_y .

1.4.1 Transformert tverrsnitt

Ved beregninger av spenningsfordeling i tverrsnitt bestående av to forskjellige materialer, i dette tilfellet armering og betong, som har forskjellige E-moduler, beregnes fordelingen over et transformert tverrsnitt. Metoden brukt transformerer tverrsnittet til et homogent tverrsnitt bestående kun av betong, med en homogen E-modul gjeldene over hele snittet.

Det transformerte tverrsnittet er kun gyldig for tverrsnitt i Stadium I, altså den antar ingen riss. Hvis spenningsfordelingen tilsier at tverrsnittet risser opp, er antagelsen ikke lenger gyldig, og beregningene må foretas på nytt, med riss tatt høyde for.

Benytter metoden for transformert tverrsnitt gitt i Betongkonstruksjoner II (Cantero, BYGT2320 Betongkonstruksjoner 2 Formelark, 2022). Videre må verdiene kalkuleres for både korttids- (ved overføring) og langtidsspenninger etter hva som undersøkes. Utledningen nedenfor blir gjort for begge tilfeller:

1.4.1.1 For korttidsspenningsfordeling (ved overføring):

Alle verdiene for transformert tverrsnitt ved korttidsspenningsfordeling vil merkes med subscript « (t_0) » for å tydeliggjøre at de er avhengig av t_0 . Først finnes gjeldende $E_{cm}(t_0)$:

$$E_{cm} = 36000 \text{ MPa}$$

$$f_{cm} = 53 \text{ MPa}$$

Fra EC2, tabell 3.1.

$$s = 0.2$$

For relasjonsklasse 2.

Finner så reduksjonsfaktoren $\beta_{cc}(t_0)$:

$$\beta_{cc}(t_0) = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t_0} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\}$$

$$f_{cm}(t_0) = \beta_{cc}(t_0) \cdot f_{cm}$$

Dette gir da $E_{cm}(t_0)$:

$$E_{cm}(t_0) = \left(\frac{f_{cm}(t_0)}{f_{cm}} \right)^{0.3} \cdot E_{cm}$$

For korttidsspenninger (ved overføring) regnes modulær ratio η , et forholdstall fra forskjellene i E-modul mellom materialene, som verdien av stålets E-modul, E_p , over betongens E-modul ved overføring $E_{cm}(t_0)$:

$$\eta_{(t_0)} = \frac{E_p}{E_{cm}(t_0)}$$

Transformert tverrsnittsareal A_t , som tar høyde for η , tverrsnittets opprinnelige areal A_{HDXXX} etter hvilken HD-element som undersøkes, samt armeringsmengde A_p :

$$A_{t(t_0)} = A_{HDXXX} + (\eta_{(t_0)} - 1) \cdot A_p$$

Forflytning av tverrsnittets geometriske tyngdepunktsakse y_t , som tar høyde for η , armeringsmengde A_p , armeringens eksentrisitet i aktuelt punkt e_p og transformert tverrsnittsareal A_t :

$$y_{t(t_0)} = (\eta_{(t_0)} - 1) \cdot A_p \cdot \frac{e_p}{A_{t(t_0)}}$$

Transformert andre arealmoment I_t , som tar inn tverrsnittets opprinnelige andre arealmoment og areal og justerer med y_t , η , A_p og e_p :

$$I_{t(t_0)} = I_{HDXXX} + A_{HDXXX} \cdot y_{t(t_0)}^2 + (\eta_{(t_0)} - 1) \cdot A_p \cdot (e_p - y_{t(t_0)})^2$$

Skrevet i Python blir dette:

```
# Transformert tverrsnitt for beregninger av laster i tverrsnitt ved overføring (SLS)
B_cc_t0 = np.e**(0.2*(1-(28/t0)**0.5))
f_cm_t0 = B_cc_t0 * f_cm
E_cm_t0 = (f_cm_t0 / f_cm)**0.3 * E_cm
n = E_p / E_cm_t0
A_t = A_c + (n-1)*A_p
yt = (n-1)*A_p*(e_p/A_t)
It = i + A_c*yt**2 + (n-1)*A_p*(e_p-yt)**2
```

Utdrag fra vedlegg 3: Pythonkode

1.4.1.2 For langtidsspenningsfordeling med hensyn på kryp:

Alle verdiene for transformert tverrsnitt ved langtidsspenningsfordeling vil merkes med subscript «L».

For spenninger etter lang tid regnes η med samme verdi for E_p , over betongens midlere E-modul etter lang tid med hensyn på kryp, E_{middel} , som endrer verdiene videre:

$$\eta_L = \frac{E_p}{E_{middel}}$$

$$A_{t,L} = A_{HDXXX} + (\eta_L - 1) \cdot A_p$$

$$y_{t,L} = (\eta_L - 1) \cdot A_p \cdot \frac{e_p}{A_{t,L}}$$

$$I_{t,L} = I_{HDXXX} + A_{HDXXX} \cdot y_{t,L}^2 + (\eta_L - 1) \cdot A_p \cdot (e_p - y_{t,L})^2$$

Skrevet i Python:

```
# Justert transformert tverrsnitt mhp kryp
kryp_n = E_p / E_middel
kryp_A_t = A_c + (kryp_n-1)*A_p
kryp_yt = (kryp_n-1)*A_p*(e_p/kryp_A_t)
kryp_It = i + A_c*kryp_yt**2 + (kryp_n-1)*A_p*(e_p-kryp_yt)**2
```

Utdrag fra vedlegg 3: Pythonkode

Merk at navngivningen i koden er litt annerledes enn i teksten, men det er de samme variablene.

Utleddning for å få E_{middel} kommer nedenfor, i langtidstap under delen om kryp.

1.5 Forspenningskraft P

Denne rapporten vil se spesielt på to bestemte områder av nedbøyningen over tid. Dette er nedbøyning = 0mm for tilfellet perfekt lastbalanse, og maks nedbøyning anbefalt av:

$$\delta_{max} = \frac{L}{250}$$

Ettersom det er disse to tilfeller rapporten fokuserer på, er det ingen grunn til å se på en forspenningskraft P mindre enn maks tverrsnittskapasitet for en gitt t_0 . Rapporten vil da altså for enkelthets skyld, i alle beregninger, benytte en maks verdi for P , utregnet etter tverrsnittets kapasitet.

Beregningsgangen for å finne verdien av maks P i Python er å kjøre en for-løkke som tar inn verdier for P fra 1 – 10000 kN. Den begynner med første verdi $P = 1\text{kN}$:

```
def finnerP(t0,L,dekke):
    P = 0

    for i in range(1, 10000):
        P_forsøk = i * 1000
```

Utdrag fra vedlegg 3: Pythonkode

Hele beregningen som følger nedenfor kjøres og returnerer verdier for $\sigma_c(y)$ i de aktuelle områdene i bjelken som kontrolleres. Kontrollen av tverrsnittskapasiteten gjøres mot disse verdiene til slutt.

1.6 Armeringsmengde i tverrsnittet

Lastene som skaper spenningene i tverrsnittet ved overføring, avhenger av P og av eksentrisiteten til armeringen e_p . Armeringen i tverrsnittet må dermed dimensjoneres først, med første kjøring av P , for å finne e_p som skal regne med videre.

Minimumsmengden armering er satt som forspenningskraften over maks tillatt spenning i armeringen. Maks spenning i armering er satt til:

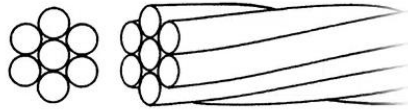
$$\sigma_{p,max} = 0.95f_{p0.1k} = 1472.5\text{MPa}$$

Etter EC2, 5.10.2.1 (2), som tillater overspenning hvis oppspenningsjekk kan måles med en nøyaktighet på $\pm 5\%$. Antar dette i denne rapporten.

Dermed blir nødvendig minimumsarmeringsmengde lik:

$$A_{s,min} = \frac{P}{1472.5}$$

Dette gir en minimumsdiameter på armeringen som vil avhenge av typen brukt. Rapporten begynner med å forutsette en 7-vaierkabel ettersom dette er det vanligste (Cantero, Forelesning L3, 2022).



7 vaiere

Figur 9: 7-vaierkabel (Mazella & Eget arbeid, 2023)

Dette gir minimum vaierdiameter avhengig av kabeltype lik:

$$d_{min} = \sqrt{\left(\frac{A_{smin}}{\text{antall_kabler} \cdot \text{antall_vaier}} \cdot \frac{4}{\pi}\right)}$$

Her er variabelen *antall_kabler* avhengig av tverrsnitt. Antall hull i hulldekket vil bestemme *antall_kabler* det er plass til i tverrsnittet og *antall_vaier* er forutsatt til 7 i denne rapporten, men avhenger av armeringstypen.

Legger inn en liste med tilgjengelige vaierdiameterer fra tabell 2 fra BYGT2320, der det er brukt alle verdier for klasse A som ikke ender på «G»:

Table 2 — Dimensions and properties of strands

| Class | Steel designation | | Nominal ^a | | | | Specified | | | | | | | |
|----------------------|-------------------|--------------|----------------------------|--|--|--------------------------------------|--|--|---|---|-----|-----|-----|-----|
| | Steel name | Steel Number | Diameter <i>d</i> Mm | Tensile strength <i>R_m</i> ^{b,1} MPa | Cross-sectional area ^c <i>S_n</i> mm ² | Mass ^c <i>M</i> g/m | Permitted deviation on nominal mass % | Characteristic value of maximum force <i>F_m</i> kN | Maximum value of maximum force <i>F_{m, max}</i> kN | Characteristic value of 0,1 % proof force ^d <i>F_{0,1}</i> kN | | | | |
| A | Y1960S3 | 1.1361 | 5.2 | 1960 | 13.6 | 106 | ± 2 | 26.7 | 30.5 | 22.9 | | | | |
| | Y1860S3 | 1.1360 | 6.5 | 1860 | 21.1 | 165 | ± 2 | 39.2 | 44.9 | 33.8 | | | | |
| | | | 6.8 | | 23.4 | 183 | | 43.5 | 49.8 | 37.4 | | | | |
| | | | 7.5 | | 29.0 | 226 | | 54.0 | 61.7 | 46.4 | | | | |
| | | | 7.0 | | 30 | 234 | | 56 | 65 | 48 | | | | |
| | Y1860S7 | 1.1366 | 9.0 | 1860 | 50 | 390 | ± 2 | 93 | 106 | 80 | | | | |
| | | | 11.0 | | 75 | 586 | | 140 | 160 | 120 | | | | |
| | | | 12.5 | | 93 | 726 | | 173 | 198 | 149 | | | | |
| | | | 13.0 | | 100 | 781 | | 186 | 213 | 160 | | | | |
| | | | 15.2 | | 140 | 1095 | | 260 | 298 | 224 | | | | |
| | | | 16.0 | | 150 | 1170 | | 279 | 319 | 240 | | | | |
| | | | Y1770S7 | | 1.1365 | 15.2 | | 1770 | 140 | 1095 | ± 2 | 248 | 282 | 213 |
| | | | | | | 16.0 | | | 150 | 1170 | | 265 | 302 | 228 |
| | B | Y1860S7G | 1.1372 | 12.7 | 1860 | 112 | 875 | ± 2 | 209 | 238 | 180 | | | |
| Y1820S7G | | 1.1371 | 15.2 | 1820 | 165 | 1290 | ± 2 | 300 | 342 | 258 | | | | |
| Y1700S7G | | 1.1370 | 18.0 | 1700 | 223 | 1740 | ± 2 | 380 | 436 | 327 | | | | |
| Y2160S3 ^e | | 1.1362 | 5.2 | 2160 | 13.6 | 106 | ± 2 | 29.4 | 33.7 | 26.2 | | | | |
| Y2060S3 ^e | | | 5.2 | 2060 | 13.6 | 106 | ± 2 | 28.0 | 32.1 | 24.1 | | | | |
| Y1960S3 ^e | | 1.1361 | 6.5 | 1960 | 21.1 | 165 | ± 2 | 41.4 | 47.3 | 35.6 | | | | |
| Y2160S7 ^e | | 1.1368 | 6.85 | 2160 | 28.2 | 220 | ± 2 | 60.9 | 69.7 | 52.4 | | | | |
| Y2060S7 ^e | 7.0 | | 2060 | 30 | 234 | ± 2 | 62.0 | 71.0 | 53.0 | | | | | |
| Y1960S7 | 1.1367 | 9.0 | 1960 | 50 | 390 | ± 2 | 98 | 112 | 84 | | | | | |

^a The nominal modulus of elasticity may be taken to be 195 GPa (kN/mm²).
^b The nominal tensile strength is calculated from the nominal cross sectional area and the specified characteristic maximum force, rounded to the nearest 10 MPa.
^c The cross-sectional area is calculated from the nominal mass and a density of 7,81 kg/dm³.
^d The specified characteristic 0.1 % proof force is approximately 86 % of the specified characteristic maximum force.
^e 3-wire strand and the 7-wire strand of diameter 6,85 mm and 7,0 mm are normally only used for prestressing with direct bond.
¹ 1 MPa = 1 N/mm².

Tabell 4: Table 2 - Dimensions and properties of strands (Cantero, Forelesning L3, 2022)

```
# Mulige armeringstyper
armering = [5.2, 6.5, 6.8, 7.0, 7.5, 9, 11, 12.5, 13, 15.2, 16]
verdige = []
```

Utdrag fra vedlegg 3: Pythonkode

Python finner første diameter i listen større enn minimumsdiameteren, og legger denne i en ny liste kalt «verdige». Med denne informasjonen kan armeringsmengden, A_p , bestemmes som:

$$A_p = \left(\text{antall_vaier} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \text{verdige}[0]^2\right) \cdot \text{antall_kabler}$$

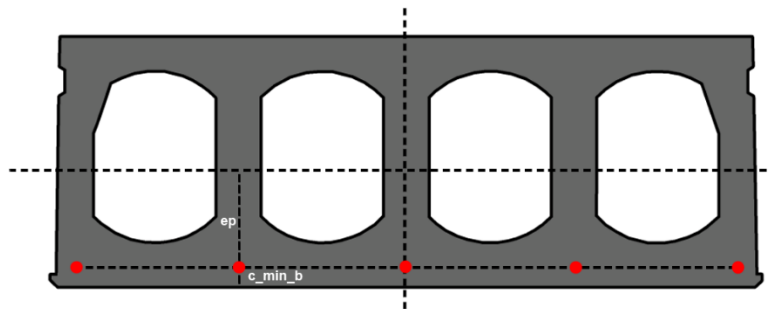
1.6.1 Litt om kabeltype

Kabeltypen valgt vil endre verdiene til tapene i forspenningen. Dette skyldes tilpasning av armeringsdiameter for å sikre beste tilnærming av $A_p \geq A_{s,min}$. En dårlig tilpasning fører til større tap. Mer om dette i 2.3 *Tapsanalyse*.

Rapporten begynte med å se kun på 7-vaierkabel, men ble utvidet for å inkludere 3- og 19-vaier, av hensyn til tap. Mer om dette i 3.1 *Optimalisering*.

1.6.2 Armeringsplassering

Plassering av armeringen i tverrsnittet er satt til mellom hullene i tverrsnittet, i tverrsnittets nedre del. Alle tverrsnitt armerings på tilsvarende måte. Se figur:



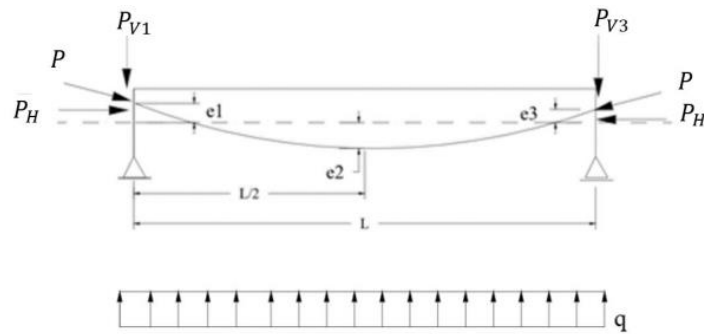
Figur 10: Armeringsplassering i tverrsnitt (Eget arbeid, 2023)

Figuren viser armeringen plassert i tverrsnittets midtpunkt, med maks eksentrisitet e_p , og minimum overdekning $c_{min,b}$.

1.7 Eksentrisitet og overdekning

For å oppnå lastbalanse med en jevnt fordelt last virkende på en forspent bjelke kreves parabolisk forspenningsgeometri med maks eksentrisitet e_p på midten, og ingen endepunktseksentrisiteter. Absolutt lastbalanse (langtidsnedbøyning = 0mm) er ikke gunstig mtp. optimalisering, men vil inkluderes i rapporten av sammenligningsgrunner.

Forspenningens geometriske profil og lastlikninger er som følger fra illustrasjon under:



$$q = P \frac{d\theta}{dx} = P \frac{d^2y}{dx^2} = \frac{8Pe_m}{L^2}$$

$$e_m = \frac{e_1}{2} + e_2 + \frac{e_3}{2}$$

$$P_{V1} = P \cdot \theta(0) = P \frac{(4e_m + e_1 - e_3)}{L}$$

$$P_{V2} = P \cdot \theta(L) = P \frac{(4e_m - e_1 + e_3)}{L}$$

Figur 11: Generell parabolisk forspenning (Cantero, 2022)

For dette tilfellet gjelder:

$$e_1 = e_3 = 0$$

$$e_2 = e_p$$

$$e_m = 0 + e_p + 0 = e_p$$

$$q = q_{forsp} = \frac{8 \cdot P \cdot e_p}{L^2}$$

$$P_{V1} = P_{V3} = P_{Vi} = P \cdot \frac{4 \cdot e_p}{L}$$

Fra likningene over kan det påvises at minimum nødvendig eksentrisitet på midten, e_p , for absolutt lastbalanse, kan finnes fra verdiene for P og L . Dette uttrykkes matematisk fra:

$$q_{forsp} = q_{Ed}$$

$$\frac{8 \cdot P \cdot e_p}{L^2} = q_{Ed}$$

$$e_p = \frac{q_{Ed} \cdot L^2}{8 \cdot P}$$

I rapporten testes verdier av P fra 1 – 10000kN mot verdier av L som går fra 0.1 – 25m, så denne metoden for å finne e_p er ikke hensiktsmessig. Siden likningene forutsetter absolutt lastbalanse, vil den finne umulige verdier for e_p , ved store verdier av L og lave verdier av P .

En annen metode er når armeringsdiameter er funnet for en gitt P , kan minimums overdekning, $c_{min,b}$, bestemmes, og maksimal eksentrisitet kan beregnes ut fra dette. Denne metoden er ansett som hensiktsmessig i denne sammenhengen. Størst mulig verdi for e_p er dessuten gunstig ift. begrensningen av nedbøyning over tid.

Overdekningen, $c_{min,b}$, er bestemt ut fra eksponeringsklasse, ihht til EC2:

$$c_{min,b} = 1.5 \cdot verdige[0] \cdot d_{antall_vaier}$$

Eksentrisitet e_p blir dermed:

$$e_p = z_c - c_{min,b} - \frac{d_{antall_vaier} \cdot verdige[0]}{2}$$

Der z_c er tverrsnittets tyngdepunktsakse avhengig av valgt tverrsnitt og d_{antall_vaier} er antallet vaier som danner diameter i armeringskabelen, 3 for 7-vaierkabel (se *Figur 9: 7-vaierkabel*).

Skrevet i Python:

```
# Mulige armeringstyper
armering = [5.2, 6.5, 6.8, 7.0, 7.5, 9, 11, 12.5, 13, 15.2, 16]
verdige = []

# Min. armering
As_min = P/1472.5
dmin_3 = (np.sqrt(((As_min/antall_kabler)*(4/np.pi)) / (antall_vaier)))

# Bestemmer armeringsdiameter
for x in range(len(armering)):
    storrelse = armering[x]

    if storrelse > dmin_3:
        verdige.append(storrelse)

# Armeringsmengde
As_del = antall_vaier*(np.pi/4)*(verdige[0]*verdige[0])
A_p = antall_kabler * As_del

# Overdekning
cmin_b = 1.5 * verdige[0] * d_antall_vaier

# Eksentrisitet
e_p = zc - cmin_b - ((d_antall_vaier*verdige[0])/2)
```

Utdrag fra vedlegg 3: Pythonkode

Det er verdt å merke her at siden e_p er satt som maks for det gitte tverrsnittet og armeringsdiameteren, vil den for flere verdier av P og L produsere verdier for nedbøyning som blir negative, altså oppover rettet nedbøyning. Dette er ikke hensiktsmessig for rapportens analyse, eller for dimensjonering av dekker generelt. Likevel velges denne metoden, ettersom disse negative nedbøyningene blir lette å identifisere i nedbøyningsberegningene, og kan dermed enkelt sees bort i fra ved resultatanalyser.

1.7.1 Laster fra forspenningskraft

Når verdiene for P og e_p er funnet, kan lastene som produserer spenninger i tverrsnittet finnes.

Laster ved midtpunkt:

$$N = -P$$

$$M_{midt} = N \cdot (e_p - y_{t(t_0)})$$

Laster ved endepunkt:

$$N = -P$$

$$M_{ende} = N \cdot (e_{p.ende} - y_{t(t_0)}) = N \cdot (-y_{t(t_0)})$$

Merk at aksialkraften N , påført av forspenningen, er lik over hele bjelkens lengde. Merk også, for tilfellet fritt opplagt bjelke, er verdien for $e_{p.ende} = 0$.

Følger fortegnskonvensjonen for transformert tverrsnitt som benytter positiv retning nedover. Foretar sjekk i betongs øvre og nedre fiber i midttverrsnittet, samt i nedre fiber i opplagerpunktet (endepunkt).

1.7.1.1 Spenninger i endefiber

Stress i nedre betongfiber i endepunkt er gitt som:

$$\sigma_{c.k}^{n.ende} = \frac{N}{A_{t.k}} + \frac{(M_{ende} - N \cdot y_{t.k})}{I_{t.k}} \cdot (z_c - y_{t.k})$$

1.7.1.2 Spenninger i midtpunkt

Ved sjekk i bjelkens midtpunkt må også momentet skapt av egenvekten tas hensyn til. Dette momentet kan uttrykkes som:

$$M_{egen} = \frac{g_{1.egenvekt} \cdot L^2}{8}$$

Merk at M_{egen} er avhengig av lengden L , som kjøres for alle lengder fra 0.1 – 25m. Den er også avhengig av egenvekten til tverrsnittet, $g_{1.egenvekt}$, som avhenger av tverrsnitt valgt. Rapporten vil se på 10 tverrsnitt. For å få med dette er $g_{1.egenvekt}$ i M_{egen} uttrykt som:

$$g_{1.egenvekt} = B_{HD} \cdot \gamma_{c,HD}$$

Der B_{HD} er bredden på elementene, som alltid er 1200mm, og $\gamma_{c,HD}$ er egenvekten til fuget dekke, gitt i [kN/m²], avhengig av valgt dekketverrsnitt.

Vanligvis justeres fordelte laster fra egenvekt med en sikkerhetsfaktor 1.2. Ser bort ifra denne her, ettersom dette momentet gir et positivt bidrag til resulterende stress i bjelken. Dette er dermed et konservativt valg.

Spenninger i øvre betongfiber i midtpunkt da er gitt som:

$$\sigma_{c.k}^{\emptyset.midt} = \frac{N}{A_{t.k}} + \frac{((M_{midt} + M_{egen}) - N \cdot y_{t.k})}{I_{t.k}} \cdot (-(h - z_c) - y_{t.k})$$

Spenninger i nedre betongfiber i midtpunkt er gitt som:

$$\sigma_{c.k}^{n.midt} = \frac{N}{A_{t.k}} + \frac{((M_{midt} + M_{egen}) - N \cdot y_{t.k})}{I_{t.k}} \cdot (z_c - y_t)$$

1.7.1.3 Maks spenninger i tverrsnitt

Verdiene $\sigma_{c,k}^{n.ende}$, $\sigma_{c,k}^{\emptyset.midt}$ og $\sigma_{c,k}^{n.midt}$ sammenlignes med verdier for maks spenninger i snittet. Først må variablene defineres.

Bruker reduksjonsfaktoren $\beta_{cc}(t_0)$ fra 1.4.1.1 For korttidsspenningsfordeling (ved overføring) til å finne trykkfastheten avhengig av t_0 :

$$f_{cm}(t_0) = \beta_{cc}(t_0) \cdot f_{cm}$$

$$f_{ck}(t_0) = f_{cm}(t_0) - 8\text{Mpa}$$

Maks trykkspenning i tverrsnittet bestemmes etter EC2, 5.10.2.2 som ved overføring er følgende:

$$\sigma_c \geq k_6 \cdot f_{ck}(t_0)$$

(For trykkspenning, definert som negativt)

Faktoren $k_6 = 0.6$, men kan settes lik 0.7 der det kan påvises at opprissing i lengderetningen kan unngås. Rapporten ser på prefabrikkerte elementer produsert i et kontrollert miljø. Dermed antar rapporten at riss i lengderetning unngås, og bruker verdien 0.7 for k_6 .

Videre begrensninger på trykkspenningen kommer fra samme klausul i EC2:

«Hvis trykkspenningen overskrider 0,45 $f_{ck}(t)$ på permanent basis, bør det tas hensyn til krypets ikke-linearitet.»

Permanent basis her vil si ved langtidsberegninger. Dette vil bli sett på i disse beregningene og tatt høyde for dersom det blir relevant.

Maks strekkspenning i tverrsnittet ved overføring er ikke definert av EC2 ettersom tverrsnittet antageligvis forblir i trykk for relevante verdier av P . Setter likevel en begrensning, avhengig av t_0 , på strekkspenningene for å sikre mot riss:

$$\sigma_c < f_{ctm}(t_0) = \beta_{cc}(t_0)^\alpha \cdot f_{ctm}$$

(For strekkspenning, definert som positivt)

Der $\alpha = 1$ for $t < 28$ dager.

1.7.2 Setter ny P

Etter denne beregningen er utført, er kontrollen for en gitt P fullført. Dersom verdien for σ_c befinner seg mellom grensene, slik at ulikhetene:

$$\sigma_{c,k}^{n.midt} \geq k_6 \cdot f_{ck}(t_0)$$

$$\sigma_{c,k}^{n.ende} \geq k_6 \cdot f_{ck}(t_0)$$

...og:

$$\sigma_{c,k}^{\emptyset.midt} < f_{ctm}(t_0)$$

...blir opprettholdt, er spenningene innenfor grenseområdet, og kontrollen er godkjent.

Python returnerer dermed denne verdien for P , og foretar sjekken på nytt med neste verdi: $P + 1$. Dette gjentas til denne sjekken ikke blir godkjent. Når dette skjer, returneres *forrige* verdi for P , altså den siste til å bestå sjekken:

```
# Lastfordelinger i tverrsnitt ved overføring

# Nedre ende
sigma_ende_overføring = (N/A_t) + ((M_e-N*yt)/It)*(zc-yt)

# Øvre midt
sigma_øvre_overføring = (N/A_t)+(((M+M_egen)-N*yt)/It)*(-(h-zc)-yt)

# Nedre midt
sigma_nedre_overføring = (N/A_t)+(((M+M_egen)-N*yt)/It)*(zc-yt)

if np.abs(sigma_nedre_overføring) < sigma_max:
    P = P_forsøk
else:
    return P
    break
```

Utdrag fra vedlegg 3: Pythonkode

Dermed er maks P funnet for et gitt tverrsnittet etter gitt t_0 .

1.8 Tapkilder i spennarmert betong

Ved beregninger av langtidseffekter som nedbøyning og spenningsfordeling er det viktig å inkludere tapkilder i beregningene. Disse deles inn i umiddelbare og tidsavhengige tap:

| Time | As in book | Type |
|----------------|-------------------|---------------------|
| Immediate | Strain-difference | Anchorage |
| | | Friction |
| | | Temperature |
| | Short time | Elastic deformation |
| Time-dependent | Time-dependent | Creep |
| | | Shrinkage |
| | | Relaxation |

Figur 12: Tapkilder i spennarmert betong (Cantero, Forelesning L9, 2022)

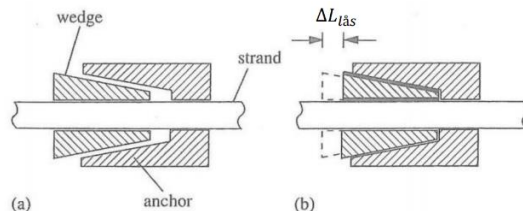
Denne rapporten vil ta høyde for alle former for relevante tap.

1.8.1 Umiddelbare tap

Disse tapene skjer mellom spennarmeringen og betong før heftforbindelse er etablert og skyldes:

1.8.1.1 Låsetap

Benytter beregningsgangen gitt i Betongkonstruksjoner (Sørensen, 2013). Spennstålet glir før kilelåsen låser seg i den aktive forankringen:



Figur 13: Detailed member design - Draw in losses (Eugene Obrien, 2012)

Låseglidningen $\Delta L_{lås}$ vil variere etter låstype og produsent. Antar:

$$\Delta L_{lås} = 5mm$$

Denne glidningen fører til en relativ forkortelse av spennarmering gitt som:

$$\Delta \varepsilon_{lås} = \frac{\Delta L_{lås}}{L}$$

Tilhørende tøying pga oppspenningen kan gis som:

$$\varepsilon_{p.0} = \frac{P_0}{E_p \cdot A_p}$$

Der E_p er stålets E-modul og A_p er armeringsmengden. Med dette kan tapet pga låsing uttrykkes som:

$$\Delta P_{lås} = \frac{\Delta \varepsilon_{lås}}{\varepsilon_{p.0}} \cdot P_0$$

Den største kraften som kan påføres spennstål gitt i Eurokoden er gitt som:

$$\sigma_{p.max} = \min\{0.8f_{pk} ; 0.9f_{p0.1k}\}$$

Der denne rapporten antar:

$$f_{pk} = 1700MPa$$

$$f_{p0.1k} = 1550MPa$$

Dette gir:

$$\sigma_{p.max} = \min\{0.8f_{pk} ; 0.9f_{p0.1k}\} = 1360MPa$$

EC2, 5.10.2.1 (2) tillater overspenning hvis jekken kan måles med en nøyaktighet på $\pm 5\%$.

Gitt dette kan maksspenningen økes til:

$$\sigma_{p.max} = 0.95f_{p0.1k} = 1472.5MPa$$

Dette gir begrensningene for hhv. spennkraften ved oppspenning og resulterende spenning etter tap:

$$P_0 = P_{jekk} \leq 0.95 f_{p0.1k} \cdot A_p$$

$$P_{p0} \leq \min\{0.8 f_{pk}; 0.9 f_{p0.1k}\} \cdot A_p$$

Skrevet i Python blir dette:

```
P_jekk = P_0
delta_L_lås = 5
delta_epsilon_lås = delta_L_lås / L
epsilon_P_jekk = P_jekk / (E_p * A_p)
delta_P_lås = (delta_epsilon_lås / epsilon_P_jekk) * P_jekk
tap_lås_prosent = (delta_P_lås / P_jekk) * 100
```

Utdrag fra vedlegg 3: Pythonkode

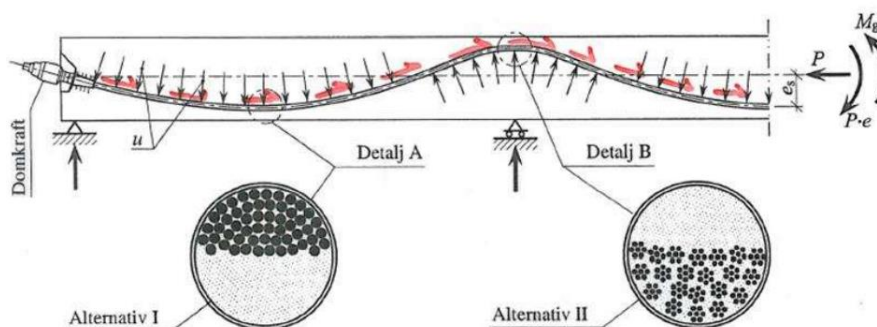
For å ta høyde for dette tapet må verdien av forspenningskraften bruk i langtidsberegninger, P , ha verdien $\Delta P_{lås}$ trukket fra.

1.8.1.2 Friksjonstap

Benytter beregningsgangen gitt i *Betongkonstruksjoner* (Sørensen, 2013). Dette kommer av friksjonskrefter mellom spennstålet og utsparingsrør ved etteroppspente betongkonstruksjoner. Friksjonskreftene oppstår når det er kurvatur i utsparingsrør og kalles derfor kurvatureffekten. EC2, 5.10.5.2 (1) gir følgende uttrykk for tap grunnet friksjon i en avstand x fra enden med jekk i etteroppspente kabler:

$$\Delta P_{\mu}(x) = P_0 - P_x = P_0(1 - e^{-(\mu(\theta+kx))})$$

Dette gir friksjonstapet i en avstand x fra siden med jekk. Friksjonskreftene virker alltid i retning mot forspenningskraften:



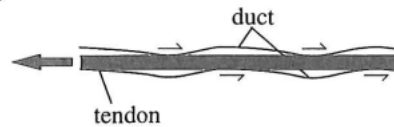
Figur 14: Skisse som viser hvordan friksjonstap oppstår i en bjelke (Cantero, Forelesning L9, 2022)

Figur 14 over illustrerer hvordan friksjonstap oppstår i en bjelke med kurvatur ved at forspenningsstålet fordeler seg i hhv. øvre og nedre sjikt i trekkørret for Alternativ I og II. For tilfellene undersøkt i denne rapporten oppstår friksjonskreftene fra samme geometri og fordeling som Alternativ I.

For å få totale friksjonstapet i elementer med lengde L settes det inn verdien av L for x :

$$\Delta P_{\mu}(L) = P_0(1 - e^{-(\mu(\theta+kL))})$$

Der θ er totale vinkelendring (summen av vinklene uavhengig av vinkelens fortegn) av spennarmeringen over lengden L i [rad]. k er en tilleggskrumning gitt av EC2, 5.10.5.2 (3), som kommer fra en utilsiktet vinkelforskyvning av innvendige kabelrør. Den avhenger av utførelse, avstand mellom kabelstøtter, vibrering av betongen ved støp og type kabelkanal. Verdien ligger vanligvis mellom $0.005 - 0.01\text{m}^{-1}$. Se *Figur 15* for detaljer:



Figur 15: Detailed member design - Friction losses (Eugene Obrien, 2012)

Ettersom undersøkt forspenningsprofil er parabolisk og dermed relativt ukomplisert antas en verdi for $k = 0.005\text{m}^{-1}$.

Variabelen μ er friksjonskoeffisienten. Avhengig av rørtype og injisering ligger den på mellom $0.05 - 0.07$ for plastrør smurt med fettmasse og $0.15 - 0.20$ for injiserte rør av korrugert stålblekk. Antar injiserte korrugerte stålrør og $\mu = 0.19$ etter EC2, 5.10.5.2 (3) tabell 5.1.

```
my_frik = 0.19
k_frik = 0.005
theta_A = (2*e_p)/(L/2)
theta_B = (2*e_p)/(L/2)
theta_midt = 0
theta_L = theta_A + theta_B

delta_P_friksjon = P*(1 - np.exp(-my_frik*(theta_L+k_frik*(L*10**(-3)))))
```

Utdrag fra vedlegg 3: Pythonkode

For å ta høyde for dette tapet må verdien av forspenningskraften brukt i langtidsberegninger, P , ha verdien $\Delta P_\mu(L)$, `delta_P_friksjon` i Python, trukket fra.

1.8.1.3 Temperaturtap

Tap i spennkraft pga temperaturdifferanse mellom spennstålet og betongen skjer før full heftforbindelse er oppnådd pga varme produsert av betongen ved herding. Dette gjelder kun for føyroppsente forspenningsystemer. Ettersom denne rapporten ser kun på etteroppsente systemer, etter full herding av betongen allerede er oppnådd, trengs ikke denne tapskilden å tas hensyn til.

1.8.1.4 Elastiske deformasjonstap

Elastisk deformasjonstap skjer pga en forkortning i betongen ved oppspenning. Siden deformasjonen skjer under oppspenningen, kan kraften økes for å ta hensyn til dette tapet. Dette gjelder imidlertid kun for konstruksjoner der alle kablene blir spent samtidig. Tapet må derimot tas hensyn til hvis kablene spennes opp og frigis hver for seg.

Ettersom elementene undersøkt i denne rapporten blir produsert på fabrikk, antas det å være mulig å spenne og friggi alle kablene samtidig. Dermed ser denne rapporten bort ifra tap pga elastiske deformasjoner.

1.8.2 Tidsavhengige tap

De tidsavhengige tapene kryp, svinn og relaksasjon av spennstålet skjer over lang tid, både i før- og etteroppspente forspenningssystemer. Denne rapporten må dermed inkludere beregninger for alle tre.

Effekten av spenningsendringer pga tidsavhengige effekter vil undersøkes i bjelkens midtpunkt, ettersom det er i dette sjiktet spenningene blir verst, samt der maks nedbøyning vil finne sted. Effekten av tap i forspenning vil undersøkes over hele bjelken.

Antagelser gjort i beregningene er: Montering foregår fortløpende etter produksjon og dermed egenlast av HD elementene kommer ved t_0 antall dager, påstøpet ved $t = 28$ dager og nyttelast ved $t = 180$ dager. Videre beregnes langtidseffektene for $t \rightarrow \infty$.

1.8.2.1 Forspenningskraft ved langtidsberegninger

Forspenningskraften for langtidsberegningene må ta høyde for de umiddelbare tapene. Dermed blir verdien for P brukt videre lik:

$$P = P_0 - \Delta P_{l\ddot{a}s} - \Delta P_{\mu}(L)$$

1.8.3 Kryp og midlere E-modul

Kryp i betong er en gradvis tøyning i tverrsnittet som følger av laster som skaper konstante spenninger over tid. Effekten av kryp er avhengig av spenninger og lastpåføringstidspunktene for hver last.

Det er flere måter å ta hensyn til kryp i dimensjoneringsberegninger. Denne rapporten kommer til å regne ut en midlere E-modul, E_{middel} . Denne tar hensyn til kryp ved å gi tilleggsdeformasjoner, og fungerer som en langtids E-modul i videre beregninger.

For å regne ut en verdi for E_{middel} må det først regnes ut en effektiv E-modul, $E_{cl}(t)$, for hver last, som tar hensyn til lastpåføringstidspunktet:

$$E_{cl}(t) = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi(\infty, t_0)}$$

Kryptallet $\varphi(\infty, t_0)$ er faktoren som justerer ned E-modulen. Den er avhengig av lastpåføringstidspunkt, betongkvalitet, relativ fuktighet, størrelsen av tverrsnittet og hvordan tverrsnittet tørker ut over tid.

Rapporten kommer til å følge Eurokode 2 sin beregningsgang for å sette kryptallet gitt i EC2 Tillegg B.1 (CEN, 2004).

Finner først $\alpha_{1/2/3}$, som er reduksjonsfaktorer som tar hensyn til betydningen av fastheten til betongtypen brukt i tverrsnittet:

$$\alpha_1 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0.7} ; \alpha_2 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0.2} ; \alpha_3 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0.5}$$

Deretter finnes effektiv tverrsnittstykkelse:

$$h_0 = \frac{2 \cdot A_c}{u}$$

Der A_c er ikke-transformert tverrsnittsareal og u er den delen av tverrsnittet som er utsatt for uttørking, her kun nedre bredde ettersom sidene og toppen blir støpt inn med henholdsvis fuger og konstruktiv påstøp. Verdien for h_0 må regnes ut for hvert tverrsnitt brukt.

Setter relativ luftfuktighet $RH = 40\%$ etter EC2 og regner ut reduksjonsfaktorer β_H og $\beta_c(t, t_0)$ som tar hensyn til hhv. relativ luftfuktighet, og betongens alder i det aktuelle tidspunktet t og lastpåføringstidspunktet t_0 .

$$RH = 40\%$$

$$\beta_H = 1.5 \cdot [1 + (0.012 \cdot RH)^{18}] \cdot h_0 + 250 \cdot \alpha_3 \leq 1500 \cdot \alpha_3$$

$$\beta_c(t, t_0) = \left[\frac{(t - t_0)}{(\beta_H + t - t_0)} \right]^{0.3}$$

Ved langtidsberegninger av $\beta_c(t, t_0)$ går $t \rightarrow \infty$:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \left[\frac{(t - t_0)}{(\beta_H + t - t_0)} \right]^{0.3} = 1$$

Ettersom $\beta_c(t, t_0) \rightarrow 1$ når $t \rightarrow \infty$ settes $\beta_c(t, t_0) = 1$.

Videre trengs reduksjonsfaktorene $\beta(f_{cm})$ og $\beta(t_0)$ som tar høyde for hhv. betongkvalitet og lastpåføringstidspunktet:

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16.8}{\sqrt{f_{cm}}} ; \beta(t_0) = \frac{1}{(0.1 + t_0^{0.20})}$$

Verdien for $\beta(t_0)$ er avhengig av lastpåføringstidspunktet og må dermed regnes ut for hver aktuelle lastpåføringstidspunkt.

Videre finnes φ_{RH} , en faktor som skal ta høyde for den relative luftfuktighetens effekt på kryptallet. For $f_{cm} > 35\text{MPa}$, er φ_{RH} definert som:

$$\varphi_{RH} = \left[1 + \frac{1 - \frac{RH}{100}}{0.1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \cdot \alpha_1 \right] \cdot \alpha_2$$

Dette gir det normerte kryptallet φ_0 , som også må regnes ut for hver aktuelle lastpåføringstidspunkt:

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0)$$

Dermed blir kryptallene $\varphi(t, t_0)$ for hvert lastpåføringstidspunkt:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \cdot \beta_c(t, t_0) = \varphi_0 \cdot 1.0 = \varphi_0$$

Finner så effektiv E-modul for alle lastpåføringstidspunktene:

$$E_{cl}(t) = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi(\infty, t_0)}$$

```
# Effektiv E-modul
alfa_1 = (35/f_cm)**0.7
alfa_2 = (35/f_cm)**0.2
alfa_3 = (35/f_cm)**0.5
u = 1200
h_0 = (2*Ac)/u
RH = 40

def B_H(h_0, alfa_3, RH):
    if True:
        B_H = 1.5 * (1 + (0.012*RH)**18) * h_0 + 250 * alfa_3
        if B_H <= 1500 * alfa_3:
            return B_H
        else:
            return 1500 * alfa_3

BH = B_H(h_0, alfa_3, RH)
Bc_t_t0 = 1
B_fcm = 16.8/np.sqrt(f_cm)
B_t0 = 1 / (1 + t0**0.2)
B_28 = 1 / (1 + 28**0.2)
B_180 = 1 / (1 + 180**0.2)
phi_RH = (1 + ((1-(RH/100)) / (0.1*h_0**(1/3)))) * alfa_1 * alfa_2

# phi(t)
phi_0_t0 = phi_RH * B_fcm * B_t0
phi_0_28 = phi_RH * B_fcm * B_28
phi_0_180 = phi_RH * B_fcm * B_180

# Kryptall
phi_3 = Bc_t_t0 * phi_0_t0
phi_28 = Bc_t_t0 * phi_0_28
phi_180 = Bc_t_t0 * phi_0_180

# Effektiv E-modul
E_cL3 = E_cm / (1 + phi_3)
E_cL28 = E_cm / (1 + phi_28)
E_cL180 = E_cm / (1 + phi_180)
```

Utdrag fra vedlegg 3: Pythonkode

1.8.3.1 Aktuelle laster

Skal finne E_{middel} ved metoden for gjennomsnittlig E-modul. Setter derfor først opp lastene og aktuelle påføringstidspunkt t .

Momentet som følge av forspenningen, påført ved t_0 antall dager:

$$M_p = -P \cdot e_p$$

For egenvekt av dekkeelementene, påført ved t_0 antall dager:

$$M_{g1.1} = \frac{g_{1.1} \cdot L^2}{8}$$

For egenvekt av påstøpet, støpt ved $t = 28$ dager:

$$M_{g1.2} = \frac{g_{1.2} \cdot L^2}{8}$$

For permanent del av nyttelast, påført ved $t = 60$ dager:

$$M_{g2(perm)} = \frac{g_{2(perm)} \cdot L^2}{8}$$

For variabel del av nyttelast, påført ved $t = 60$ dager:

$$M_{g2(var)} = \frac{g_{2(var)} \cdot L^2}{8}$$

Lastene i Python:

```
# Laster
M_p = - P * e_p
M_g1_1 = ((g1_1 * L**2) / 8) * 10**6
M_g1_2 = ((g1_2 * L**2) / 8) * 10**6
M_g2_perm = ((0.5 * g2 * L**2) / 8) * 10**6
M_g2_var = ((0.5 * g2 * L**2) / 8) * 10**6
```

Utdrag fra vedlegg 3: Pythonkode

Gjennomsnittlig E-modul:

$$\frac{\Sigma|M|}{E_{middel}} = \frac{|M_p|}{E_{cL}(3)} + \frac{|M_{g1.1}|}{E_{cL}(3)} + \frac{|M_{g1.2}|}{E_{cL}(28)} + \frac{|M_{g2(perm)}|}{E_{cL}(180)} + \frac{|M_{g2(var)}|}{E_{cm}}$$

Løser for E_{middel} :

$$E_{middel} = \frac{\Sigma|M|}{\frac{|M_p|}{E_{cL}(3)} + \frac{|M_{g1.1}|}{E_{cL}(3)} + \frac{|M_{g1.2}|}{E_{cL}(28)} + \frac{|M_{g2(perm)}|}{E_{cL}(180)} + \frac{|M_{g2(var)}|}{E_{cm}}}$$

```
# Gjennomsnittlig E-modul
E_middel_overs = (np.abs(M_p)) + (np.abs(M_g1_1)) + (np.abs(M_g1_2)) + (np.abs(M_g2_perm)) + (np.abs(M_g2_var))
E_middel_unders = ((np.abs(M_p))/(E_cL3)) + ((np.abs(M_g1_1))/(E_cL3)) + ((np.abs(M_g1_2))/(E_cL28)) +
((np.abs(M_g2_perm))/(E_cL180)) + ((np.abs(M_g2_var))/(E_cm))
E_middel = E_middel_overs / E_middel_unders
```

Utdrag fra vedlegg 3: Pythonkode

Formålet med programmeringen i Python er å enkelt kunne endre variabelen t_0 .

For å få med effekten av kryp må det transformerte tverrsnittet endres, slik som beskrevet tidligere i delen om transformert tverrsnitt. Nye verdier for η , A_t , y_t og I_t finnes ved å bruke verdien E_{middel} i beregningene.

1.8.3.2 Effekten av kryp på forspenningskraft

For å finne tap i forspenningskraft pga kryp kan verdiene for spenning i armeringen σ_p^e beregnes både med og uten hensyn på kryp. Disse verdiene deles så på hhv E_{cm} og E_{middel} for å finne langtids- og korttidstøyning med og uten hensyn på kryp, der subscript « k » og « L » viser til hhv. kortsiktig (uten kryp) og langsiktig (med kryp):

$$\sigma_{p,k}^e = \frac{N}{A_t} + \frac{M + M_{egen} - N \cdot y_t}{I_t} \cdot (e_p - y_t)$$

$$\sigma_{p,L}^e = \frac{N}{A_{t,kryp}} + \frac{M_{kryp} + M_{Laster.langtid} - N \cdot y_{t,kryp}}{I_{t,kryp}} \cdot (e_p - y_{t,kryp})$$

Der alle verdier for langtidsberegninger benytter transformert tverrsnitt og laster med hensyn på kryp, samt inkluderer alle langtidslaster.

$$M = N \cdot (e_p - y_t); M_{kryp} = N \cdot (e_p - y_{t.kryp}); M_{egen} = M_{g1.1}; M_{Laster.langtid} = M_{g1.1} + M_{g1.2} + M_{g2(perm)}$$

Verdiene for hhv. korttids- og langtidstøyning er gitt som:

$$\varepsilon_k = \frac{\sigma_{P,k}^{\emptyset}}{E_{cm}}$$

$$\varepsilon_L = \frac{\sigma_{P,L}^{\emptyset}}{E_{middel}}$$

Som gir endring av spenning og kraft i armeringen:

$$\Delta\sigma_{P.kryp} = (\varepsilon_L - \varepsilon_k) \cdot E_p$$

$$\Delta P_{kryp} = \Delta\sigma_{P.kryp} \cdot A_p$$

```
# Tap i forspenning
sigma_Pk = (N/A_t)+(((M+M_laster_langtid)-N*yt)/It)*(e_p-yt)
sigma_PL = (N/kryp_A_t)+(((M_kryp+M_laster_langtid)-N*kryp_yt)/kryp_It)*(e_p-kryp_yt)
epsilon_k = sigma_Pk / E_cm
epsilon_L = sigma_PL / E_middel
delta_sigma_P_kryp = (epsilon_L - epsilon_k) * E_p
delta_P_kryp = delta_sigma_P_kryp * A_p
```

Utdrag fra vedlegg 3: Pythonkode

Verdien ΔP_{kryp} må trekkes fra opprinnelig verdi for P ved alle nedbøyningsberegninger for å ta hensyn til effekten av kryp.

1.8.3.3 Effekten av kryp på spenningsfordeling i tverrsnittet

Spenningen i en gitt høyde av tverrsnittet uttrykkes som:

$$\sigma_{c,k}(y) = \frac{N}{A_{t.kryp}} + \frac{M_{kryp} + M_{Laster.langtid} - N \cdot y_{t.kryp}}{I_{t.kryp}} \cdot (y - y_{t.kryp})$$

Her settes det inn verdi for y for det området av tverrsnittet som skal undersøkes. Denne rapporten vil se på topp og bunn spennets midje ettersom det er i dette sjiktet belastningen på tverrsnittet blir verst.

```
# Spenningsfordeling mhp kryp, Langtid

# Nedre ende
sigma_ende_kryp = (N/kryp_A_t) + ((M_e_kryp-N*kryp_yt)/kryp_It)*(zc-kryp_yt)
print('sigma_nedre_ende_kryp =',round(sigma_ende_kryp,3),'MPa')
# Øvre midt
sigma_øvre_kryp = (N/kryp_A_t)+(((M_kryp+M_laster_langtid)-N*kryp_yt)/kryp_It)*(-(h-zc)-kryp_yt)
print('sigma_øvre_midt_kryp =',round(sigma_øvre_kryp,3),'MPa')
# Nedre midt
sigma_nedre_kryp = (N/kryp_A_t)+(((M_kryp+M_laster_langtid)-N*kryp_yt)/kryp_It)*(zc-kryp_yt)
print('sigma_nedre_midt_kryp =',round(sigma_nedre_kryp,3),'MPa')
```

Utdrag fra vedlegg 3: Pythonkode

1.8.4 Svinn

Svinn er en spenningsuavhengig forkortningsseffekt som påfølger av uttørking av betongen. Betong inneholder mer vann enn nødvendig for kjemiske reaksjoner ved herding. Dette overflødig vannet tørker ut over tid. Effekten av svinn kan være betydelig stor, og kan mulig føre til risser og deformasjoner i tverrsnittet.

Antagelser gjort i svinnberegning: $RH = 40\%$, som tidligere, og betong B45 sementklasse R. Benytter beregningsgangen i Eurokode 2 Tillegg B.2 for fastsetting av svinn (CEN, 2004).

Total svinntøyning uttrykkes som:

$$\varepsilon_{cs} = -(\varepsilon_{ca} + \varepsilon_{cd})$$

Der ε_{cd} er uttørkningssvinnet på grunn av fukttransport i betongen og ε_{ca} er såkalt autogent svinn fra uttørkingen i herdeperioden (også kalt plastisk svinn). Summen av disse settes negative ettersom det er en krympingseffekt.

Finner først faktorene gitt fra B45, sementklasse R og RH :

$$\begin{aligned} f_{ck} &= 45\text{MPa}; f_{cm} = 53\text{MPa}; f_{cm0} = 10\text{MPa} \\ \alpha_{ds1} &= 6; \alpha_{ds2} = 0.11 \Rightarrow (\text{For sementklasse R}) \\ RH &= 40\%; RH_0 = 100\% \end{aligned}$$

Finner reduksjonsfaktoren β_{RH} , som tar hensyn til relativ luftfuktighet:

$$\beta_{RH} = 1.55 \left[1 - \left(\frac{RH}{RH_0} \right)^3 \right]$$

Reduksjonsfaktor $\beta_{ds(t,ts)}$ tar høyde for betongs alder i det aktuelle tidspunktet i døgn, betongens alder ved starten på uttørkningssvinnet og tverrsnittets effektive tverrsnittstykkelse:

$$\beta_{ds(t,ts)} = \frac{(t - t_s)}{(t - t_s) + 0.04\sqrt{h_0^3}}$$

For svinn som langtidseffekt går $t \rightarrow \infty$ i uttrykket for $\beta_{ds(t,ts)}$. Da blir verdien gitt av:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{(t - t_s)}{(t - t_s) + 0.04\sqrt{h_0^3}} = 1$$

Ettersom $\beta_{ds(t,ts)} \rightarrow 1$ når $t \rightarrow \infty$ settes denne faktoren = 1.

Verdien k_h er en koeffisient avhengig av h_0 . Den kan finnes ved lineær interpolasjon av verdiene fra EC2, tabell 3.3:

Tabell 3.3 – Verdier for k_h i uttrykk (3.9)

| h_0 | k_h |
|-------|-------|
| 100 | 1,0 |
| 200 | 0,85 |
| 300 | 0,75 |
| ≥ 500 | 0,70 |

Tabell 5: Tabell 3.3 - Verdier for k_h i uttrykk (3.9) (CEN, 2017)

Verdien for k_h og h_0 må regnes ut for hvert tverrsnitt brukt.

Nominell verdi for svinntøyning $\varepsilon_{cd,0}$ er gitt av:

$$\varepsilon_{cd,0} = 0.85 \left[(220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot \exp\left(-\alpha_{ds2} \cdot \frac{f_{cm}}{f_{cm0}}\right) \right] \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RH}$$

Uttøringssvinntøyningen over lang tid $\varepsilon_{cd(\infty)}$:

$$\varepsilon_{cd}(\infty) = \beta_{ds(t,ts)} \cdot k_h \cdot \varepsilon_{cd,0}$$

Verdien for autogent svinn ε_{ca} er definert av betongtypen som:

$$\varepsilon_{ca} = 2.5 (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6}$$

Dermed er totale langtidssvinntøyningen gitt som:

$$\varepsilon_{cs} = -(\varepsilon_{ca} + \varepsilon_{cd}(\infty))$$

```
# Svinn - Antar sementklasse R
alfa_ds1 = 6
alfa_ds2 = 0.11
f_cm0 = 10
RH_0 = 100
B_RH = 1.55 * (1-(RH/RH_0)**3)

epsilon_cd0 = 0.85 * ( (220+110*alfa_ds1)*np.e**(-alfa_ds2*(f_cm/f_cm0)) ) * 10**(-6) * B_RH

k_h = 0.717
B_ds_t_ts = 1
epsilon_cd_t = B_ds_t_ts * k_h * epsilon_cd0
epsilon_ca_t = 2.5 * (f_ck - 10) * 10**(-6)
epsilon_cs_t = - (epsilon_cd_t + epsilon_ca_t)
```

Utdrag fra vedlegg 3: Pythonkode

1.8.4.1 Effekten av svinn på forspenningskraften

Effekten av svinn på forspenningskraften skjer fordi armeringen blir tvunget til å følge etter krympingseffekten. Dette minker verdien av forspenningskraften P over tid ved å skape effekten av en tilleggsaksiallast N_s , som igjen bidrar til tilleggsmoment M_s på tverrsnittet:

$$N_s = -\varepsilon_{cs} \cdot E_p \cdot A_p$$

$$M_s = N_s \cdot (e_p - y_{t.krypp})$$

```
# Krefter grunnt svinn
N_s = - epsilon_cs_t * E_p * A_p
M_s = N_s * (e_p - krypp_yt)
```

Endring av tøyningen i armering pga svinn er gitt av:

$$\varepsilon_{c,s}(e) = \varepsilon_{cs} + \frac{N_s}{E_{middel} \cdot A_{t.krypp}} + \frac{M_s}{E_{middel} \cdot I_{t.krypp}} \cdot (e_p - y_{t.krypp})$$

Dette medfører en endring av spenningen i armeringen:

$$\Delta\sigma_{P,svinn} = \varepsilon_{c,s}(e) \cdot E_P$$

Som gir tap i forspenningskraft P :

$$\Delta P_{svinn} = \Delta\sigma_{P,svinn} \cdot A_p$$

```
# Armering
epsilon_c_s_e = epsilon_cs_t + N_s/(E_middel * kryp_A_t) + M_s/(E_middel * kryp_I_t)*(e_p-kryp_yt)
delta_sigma_P_s = epsilon_c_s_e * E_p
delta_P_svin = delta_sigma_P_s * A_p
print('Endring i P pga svinn =',round(delta_P_svin/10**3,3),'kN')
```

Utdrag fra vedlegg 3: Pythonkode

Svinn i betongen skaper altså krefter som reduserer forspenningskraften P med ΔP_{svinn} . Dette tapet må inkluderes i videre beregninger.

1.8.4.2 Effekten av svinn på spenningsfordeling i tverrsnittet

Spenningsendringen i tverrsnittet på grunn av svinn uttrykkes som:

$$\Delta\sigma_{c,s}(y) = \frac{N_s}{A_{t.krypp}} + \frac{M_s}{I_{t.krypp}} \cdot (y - y_{t.krypp})$$

```
# Øvre midt
delta_sigma_øvre_midt_svin = (N_s / (kryp_A_t)) + (M_s / (kryp_I_t))*(-(h-zc)-kryp_yt)
print('Delta_sigma_øvre_midt_svin =',round(delta_sigma_øvre_midt_svin,3),'MPa')
# Nedre Midt
delta_sigma_nedre_midt_svin = (N_s / (kryp_A_t)) + (M_s / (kryp_I_t))*(zc-kryp_yt)
print('Delta_sigma_nedre_midt_svin =',round(delta_sigma_nedre_midt_svin,3),'MPa')
```

Utdrag fra vedlegg 3: Pythonkode

Verdiene for $\Delta\sigma_{c,s}(topp)$ og $\Delta\sigma_{c,s}(bunn)$ inkluderes i langtidsberegningene ved at de legges til langtidsspenningene.

1.8.5 Relaksasjon

Relaksasjon av forspenningsstål er en effekt som gir spenningsreduksjon i forspenningsstålet som følge av en konstant tøyning. Det kommer av at forspenningsstålet gradvis strekker seg og dermed mister noe av opprinnelig spenning.

Benytter beregningsmetoden i EC2, 3.3.2 for beregningene av relaksasjon (CEN, 2004).

Antagelser for denne beregningen klasse 2 – tråd eller tau m/lav relaksasjon. Da kan tap av spenning i forspenningsstålet uttrykkes som:

$$\Delta\sigma_{pr} = \sigma_{pi} \cdot 0.66 \cdot \rho_{1000} \cdot e^{9.1\mu} \cdot \left(\frac{t}{1000}\right)^{0.75(1-\mu)} \cdot 10^{-5}$$

Der:

$$\sigma_{pi} = \sigma_{pm0} = \min(k_7 \cdot f_{pk} ; k_8 \cdot f_{p0,1k})$$

$$\mu = \frac{\sigma_{pi}}{f_{pk}} = \frac{\sigma_{pm0}}{f_{pk}}$$

$$\rho_{1000} = 2.5\%$$

...og:

$$t = 500000 \text{ timer}$$

Dette svarer til tap i forspenningskraft gitt som:

$$P_{tap.relaksasjon} = -\Delta\sigma_{pr} \cdot A_p$$

Denne verdien representerer reduksjonen i forspenningen på grunn av relaksasjon ved en forspenningskraft lik P . Denne metoden tar altså ikke høyde for reduksjonen av P pga andre langtidseffekter. Disse andre effektene senker også verdien for P , og gjør at dette tallet blir noe høyt, ettersom den avhenger av P . For å ta høyde for dette er det vanlig å redusere med en faktor 0.8, etter anvisning fra Eurokode 2 5.10.6 (1) (CEN, 2004).

Den justerte verdien for tap i forspenningskraft på grunn av relaksasjon blir dermed:

$$\Delta P_{relaksasjon} = 0.8 \cdot P_{tap.relaksasjon}$$

```
# Relaksasjon
rho_1000 = 2.5
# sigma_pm0 = min {0.75*f_pk ; 0.85 * f_p01k}
sigma_pm0 = 1275
my = sigma_pm0 / f_pk
t = 500000
delta_sigma_pr = 0.8 * (sigma_pm0 * 0.66 * rho_1000 * np.e**(9.1*my) * (t/1000)**(0.75*(1-my)) * 10**(-5))
# Armering
delta_sigma_armering = -delta_sigma_pr
delta_P_relaksasjon = delta_sigma_armering * A_p
```

Utdrag fra vedlegg 3: Pythonkode

Verdien $\Delta P_{relaksasjon}$ trekkes fra P for å ta hensyn til reduksjonen.

1.8.5.1 Effekten av relaksasjon på spenningsfordeling i tverrsnittet

Relaksasjonstapet i forspenningen medfører også en endring av spenningen i betongen i tverrsnittet som følge av nye krefter på tverrsnittet:

$$N_{pr} = \Delta\sigma_{pr} \cdot A_p$$
$$M_{pr} = N_{pr} \cdot (e_p - y_{t.kryp})$$
$$\Delta\sigma_{c,r}(y) = \frac{N_{pr}}{A_{t.kryp}} + \frac{M_{pr}}{I_{t.kryp}}(y - y_{t.kryp})$$

```
# Laster pga relaksasjon
N_r = delta_sigma_pr * A_p
M_r = N_r * (e_p - kryp_yt)

# Endring av spenning i tverrsnittet grunnet relaksasjon
# Øvre midt
delta_sigma_øvre_midt_relaksasjon = (N_r / (kryp_A_t)) + (M_r / (kryp_I_t))*(-(h-zc)-kryp_yt)
print('Delta_sigma_øvre_midt_relaksasjon =',round(delta_sigma_øvre_midt_relaksasjon,3),'MPa')
# Nedre midt
delta_sigma_nedre_midt_relaksasjon = (N_r / (kryp_A_t)) + (M_r / (kryp_I_t))*(zc-kryp_yt)
print('Delta_sigma_nedre_midt_relaksasjon =',round(delta_sigma_nedre_midt_relaksasjon,3),'MPa')
```

Utdrag fra vedlegg 3: Pythonkode

Verdiene for $\Delta\sigma_{c,r}(topp)$ og $\Delta\sigma_{c,r}(bunn)$ inkluderes i langtidsberegningene ved at de legges til langtidsspenningene.

1.8.6 Andre tapskilder

Fuktighets- og temperaturendringer er også faktorer som kan påvirke betongkonstruksjoner over tid, men er sett bort ifra i denne rapporten ettersom tverrsnittet antas for enkelthets skyld å befinne seg i innvendige, stabile omgivelser.

1.9 Langtids spenningsfordeling

Resultatet av alle langtidsvirkningene er summen av bidragene fra hver langtidseffekt:

$$\sigma_{c,L}(y) = \sigma_{c,k}(y) + \Delta\sigma_{c,s}(y) + \Delta\sigma_{c,r}(y)$$

For en gitt høyde y i tverrsnittet.

```
# Endelig spenning i tverrsnittet etter lang tid
# Øvre midt
sigma_endelig_øvre = sigma_øvre_kryp + delta_sigma_øvre_midt_svinns + delta_sigma_øvre_midt_relaksasjon
print('Endelig spenning øvre snitt =',round(sigma_endelig_øvre,3),'MPa')
# Nedre midt
sigma_endelig_nedre = sigma_nedre_kryp + delta_sigma_nedre_midt_svinns + delta_sigma_nedre_midt_relaksasjon
print('Endelig spenning nedre snitt =',round(sigma_endelig_nedre,3),'MPa')
```

Utdrag fra vedlegg X: Pythonkode

Til slutt trekkes tapene i forspenningskraften fra opprinnelige kraft P for å få endelig verdi for forspenningskraften etter tid:

$$P_{endelig} = P + \Delta P_{kryp} + \Delta P_{svinn} + \Delta P_{relaksasjon}$$

```
# Armering
P_endelig = P + delta_P_kryp + delta_P_svin + delta_P_relaksasjon
print('P langt tid =', round(P_endelig/10**3,3), 'kN')
```

Utdrag fra vedlegg 3: Pythonkode

Verdien $P_{endelig}$ er verdien for P som skal brukes i nedbøyningsberegninger.

1.10 Nedbøyningsberegninger

For nedbøyningsberegninger brukes:

$$P_{endelig} = P + \Delta P_{kryp} + \Delta P_{svinn} + \Delta P_{relaksasjon}$$

Langtids ytre last på elementet som bidrar til nedbøyningen av elementet kommer fra den fordelte lasten på elementet fra egen- og nyttelastene:

$$q_{Ed} = 1.2 \cdot (g_{1.1} + g_{1.2}) + 1.5 \cdot g_2$$

Der sikkerhetsfaktorene 1.2 og 1.5 på hhv. egenvekten ($g_{1.1} + g_{1.2}$) og nyttelasten g_2 er tatt med EC2 – Tabell 2.1N. Verdien for nyttelasten g_2 er fastsatt etter NS3491-1, og $g_{1.1}$ og $g_{1.2}$ er bestemt av hhv. egenvekten til tverrsnittet og vekten av påstøpet.

Langtids indre last som bidrar til nedbøyning, kommer fra den fordelte lasten fra forspenningen:

$$q_{forsp} = \frac{8 \cdot P_{endelig} \cdot e_p}{L^2}$$

Nedbøyning fra en fordelt last på en fritt opplagt bjelke er gitt generelt som:

$$\delta = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I}$$

For dette tilfellet blir nedbøyningsbidragene dermed:

$$\delta_{qEd} = \frac{5 \cdot q_{Ed} \cdot L^4}{384 \cdot E_{middel} \cdot I_{t,L}}$$

...og:

$$\delta_{qforsp} = \frac{5 \cdot q_{forsp} \cdot L^4}{384 \cdot E_{middel} \cdot I_{t,L}}$$

Totalt kan langtidsnedbøyningen δ_{tot} uttrykkes som summen av nedbøyningsbidragene fra last og egenvekt og bidraget fra forspenningen:

$$\delta_{tot} = \delta_{qed} + \delta_{forsp}$$

Skrevet i Python:

```
# Nedbøyninger i tverrsnittet etter Lang tid
qed = 1.2*(g1_1 + g1_2) + 1.5*(g2)
q_forspenning = (8 * P_endelig * e_p) / (L*10**3)**2

#Beregning av nedbøyning
def nedbøyning(p):
    return (5*p*(L*10**3)**4)/(384*E_middel*It)
```

Utdrag fra vedlegg 3: Pythonkode

Python kjører beregningene over med verdi av P satt etter tverrsnittet, etter en økende verdi for lengden L , etter gitt t_0 , og returnerer endelig nedbøyning for de gitte parameterne. Programmet gjør dette for alle tverrsnitt, over lengder av L fra 0.1 – 25m for å kunne sette opp grafen av nedbøyning over L . Funksjonen over kalles for både nedbøyning av laster og nedbøyning fra forspenning for å finne total nedbøyning:

```
# Total nedbøyning
tot_nedbøyning = nedbøyning(qed) - nedbøyning(q_forspenning)
print("Nedbøyning pga egenvekt: " + str(round(nedbøyning(qed), 2)) + "mm")
print("Nedbøyning pga forspenning: -" + str(round(nedbøyning(q_forspenning), 2)) + "mm")
print('\n')
print("Total nedbøyning = " + str(round(tot_nedbøyning, 2)) + "mm")
print('Maks nedbøyning =', L/250*10**3, 'mm')
```

Utdrag fra vedlegg 3: Pythonkode

2.1 Analyse

For å kontrollere at koden i Python er satt opp rett, samt for å sikre gunstigste mulige resultater på optimaliseringen av hulldেকেelementene, følger analyser av resultatene koden genererer. Dette inkluderer en spenningsanalyse ved overføring og lang tid, tapsanalyse for tap i forspenningskraften, og nedbøyningsanalyse.

Alle resultatene settes opp ift. rapportens bestemte definisjonsområder. Dette er lengde L fra 0.1 – 25m, nedbøyning $0 < \delta < L/250$, herdetid t_0 fra 3 – 28 dager, HD-tverrsnitt fra HD200 – HD520, forspenningskraft $P = P_{maks}$ ift. tverrsnittets toleransegrenser, armeringsarealer A_p og $A_{s,min}$ bestemt fra P , samt lastene og tverrsnittsgeometrien beskrevet tidligere.

2.1.1 Litt om formatet på grafene

Alle grafene som følger, er satt opp for alle 10 HD-tverrsnitt som undersøkes i denne rapporten, altså HD200 – HD520. Hver iterasjon som danner grafene kjøres med maks påsatt forspenningskraft P og maks eksentrisitet e_p som tverrsnittene tåler, med armeringsmengden satt deretter, som beskrevet tidligere.

Hver linje på grafene representerer et HD-tverrsnitt. Linjene starter i punktet der absolutt lastbalanse er oppnådd, der langtidsnedbøyningen er lik 0, og slutter i punktet der verdien overskrider $L/250$. Altså nedbøyning δ_{tot} : $0 < \delta_{tot} < L/250$. Dette gjelder uavhengig av hva som plottes på x- og y-aksen.

Alle grafene er vist med trendlinje. Merk at denne kan bli misvisende i enkelte av tilfellene. Dette vil bli beskrevet nærmere der det er aktuelt. Videre er det gjort et forsøk på å holde de samme grensene på alle grafene, for å unngå misvisende visualiseringer. Eventuelle avvik fra dette vil bli påpekt.

Beskrivelser under hver graf vil også bli gitt, supplert med utskrifter fra Python for tallverdier, samt bruk av likningene beskrevet tidligere i rapporten, der det er relevant. Dette er av hensyn å sikre forståelsen for leser.

2.2 Spenningsanalyse

Pythonkoden er utarbeidet til å automatisk regne ut verdi av maks forspenningskraften P og eksentrisiteten e_p som elementet tåler ved overføring, som beskrevet tidligere. For å kontrollere at alt er satt opp riktig, og at elementene ikke bærer noen risiko for riss, som endrer forutsetningene for regnemetodene benyttet, følger en spenningsanalyse ved overføring og for lang tid.

Spesifikt for grafene ved spenningsanalysen er at hvert tverrsnitt føres med to linjer, for spenningene i øvre og nedre snitt. Disse linjene skilles med egen farge for hvert tverrsnitt, og linjene ført som heltrukne og stiplede for spenninger i hhv. øvre og nedre betongfiber.

2.2.1 Spenninger ved overføring

Spenningene tverrsnittene tåler ved overføring er definert tidligere av:

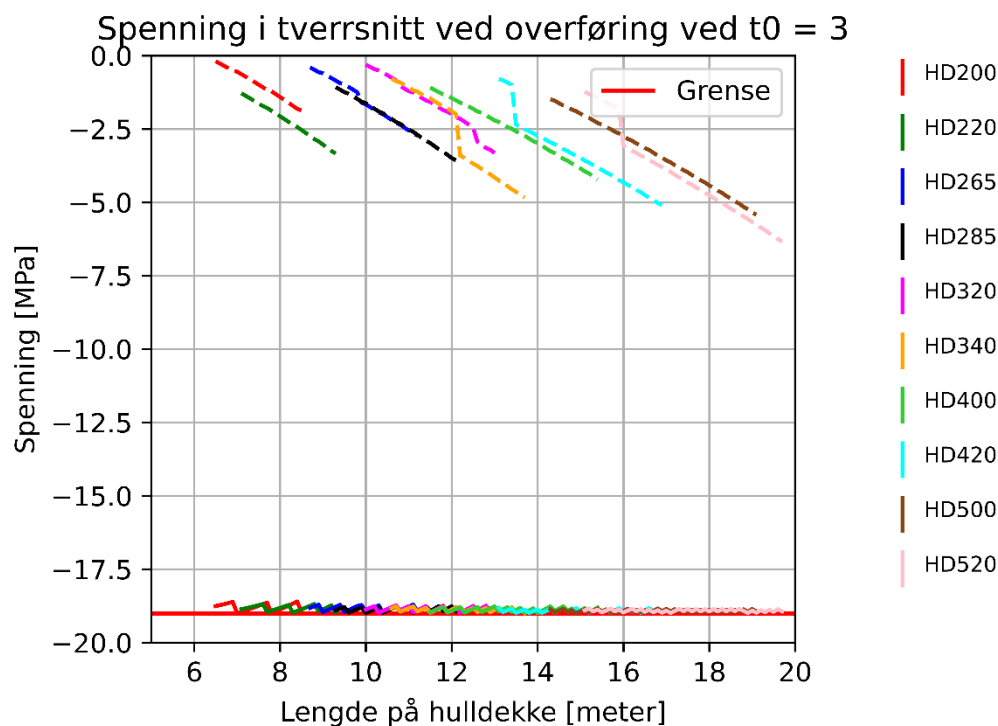
$$\sigma_{c,k}^{n.midt} \geq k_6 \cdot f_{ck}(t_0)$$

$$\sigma_{c,k}^{n.ende} \geq k_6 \cdot f_{ck}(t_0)$$

...og:

$$\sigma_{c,k}^{\emptyset.midt} < f_{ctm}(t_0)$$

Dermed er maks spenning avhengig av t_0 , der økninger av t_0 øker hva tverrsnittet tåler. Grafen under viser spenningene ved overføring som funksjon av lengden L , og som funksjon av t_0 , for å undersøke spenningens oppførsel etter disse parameterne:



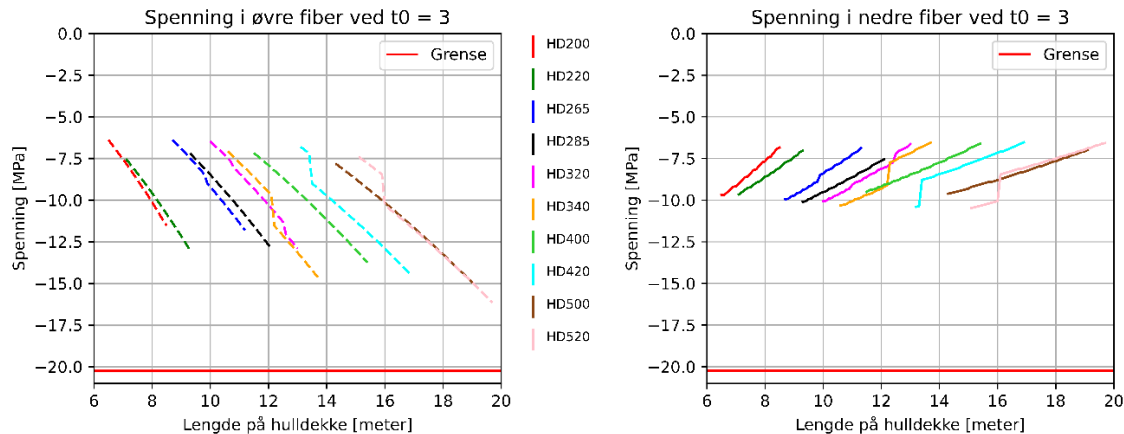
Figur 16: Spenning i tverrsnitt ved overføring ved $t_0 = 3$ (Eget arbeid, 2023)

Spenningene i øvre del av tverrsnittene er representert ved stiplet linje. For alle lengdene L er hele tverrsnittet i trykk, så begrensningen $\sigma_{c,k}^{\emptyset.midt} < f_{ctm}(t_0)$ er opprettholdt. Som forventet ligger spenningene i nedre del av tverrsnittet helt nede mot grensen på $k_6 \cdot f_{ck}(t)$, slik som definert tidligere.

Dette innebærer at risiko for riss og lokal knusing er unngått ved overføring, samt bekrefter at koden er satt opp rett ihht. gjeldende parametere og begrensninger.

2.2.2 Langtidsspenning

Grafene under viser endelig spenninger i tverrsnittene etter lang tid, mot lengden L :



Figur 17: Spenning i øvre og nedre fiber ved $t_0 = 3$ (Eget arbeid, 2023)

Grenselinjen representerer $0.45 \cdot f_{ck}$, etter nevnte klausul i EC2:

«Hvis trykkspenningen overskrider $0,45 f_{ck}(t)$ på permanent basis, bør det tas hensyn til kryptets ikke-linearitet.»

Ettersom trykkspenningene ikke overskrider denne grensen, trengs ikke dette å tas hensyn til.

Grafene viser at økninger i trykkspenning for elementenes øvre fiber, og reduksjon av trykkspenninger i nedre fiber. Dette er som forventet. Med de gitte parameterne forblir elementene i trykk, og risikoen for riss er unngått innenfor rapportens definerte nedbøyningsområde på $0 < \delta_{tot} < L/250$.

Hoppene kommer fra økninger i armeringsdiameter for å sikre $A_p \geq A_{s,min}$. Disse hoppene minker trykkspenningene i nedre fiber, og øker dem i øvre. Dette betyr at økningene i armeringsdiameter er ikke gunstige for endelig spenningsfordeling i tverrsnittet, og heller ikke gunstig for langtidsnedbøyninger, som vil undersøkes senere. Dårlig tilpasset A_p vil også gi store bidrag til tap av forspenningskraft, som rapporten vil undersøke nå i neste del.

2.2.3 Konklusjon av spenningsanalyse

Spenningsfordelingen i tverrsnittene oppfører seg som forventet. Det er ingen risiko for riss, og kryptets ikke-linearitet trengs ikke å tas hensyn til. Armeringsmengden gir imidlertid negative bidrag til spenningsfordelingen.

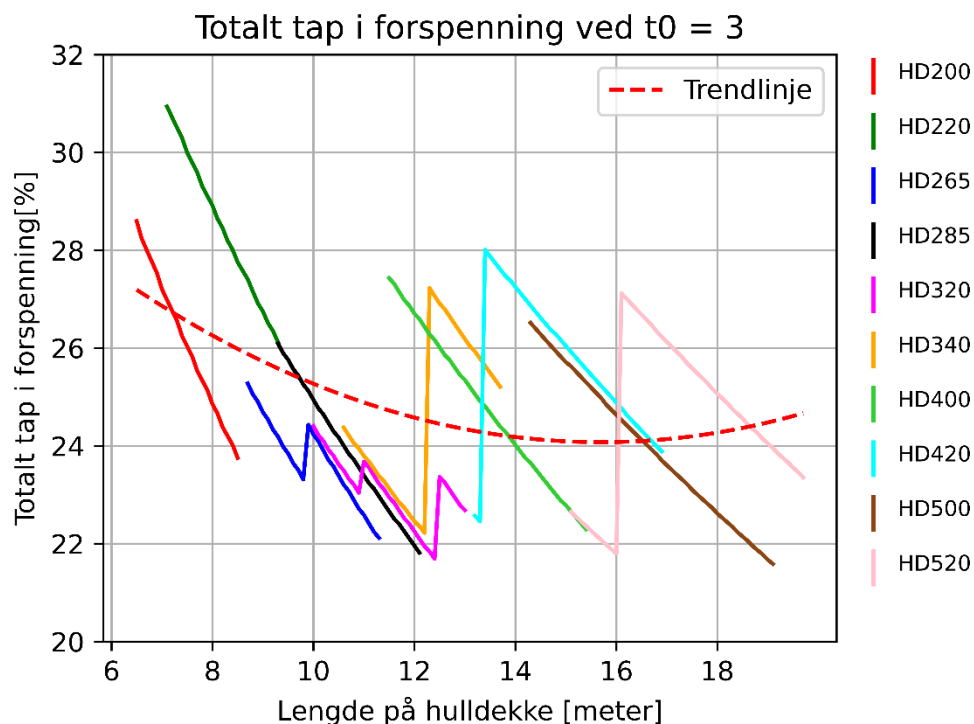
2.3 Tapsanalyse

Mindre tap i forspenningskraften vil bidra direkte til mindre nedbøyning i tverrsnittet over tid. Derfor er det hensiktsmessig å redusere tap i tverrsnittet mest mulig ved optimalisering av dekkevalg. For å kunne gjøre dette plottes tapene mot relevant variabel for å identifisere sammenhenger og se de største bidragsyterne til totaltapet.

Der det er relevant, vil det også undersøkes om tap påvirkes av endringer av t_0 . Informasjonen som kommer fram under denne analysen vil brukes videre i nedbøyningsanalysen og optimalisering, for å oppnå gunstigste resultater med vilkårlig tverrsnitt og lengde.

2.3.1 Total tap mot L

Settes det opp graf over total tap i prosent mot L for et tverrsnitt av vilkårlig lengde kan sammenhengen mellom total tap og L komme fram for et vilkårlig dekketverrsnitt:



Figur 18: Totalt tap i forspenning ved $t_0 = 3$ (Eget arbeid, 2023)

Merk at grensene på y-aksen på grafen går fra 21 – 31%. Merk også at grensen på x-aksen starter først etter $L = 6\text{m}$. Dette kommer av at ingen tverrsnitt har absolutt lastbalanse ved lengder $< 6\text{m}$. I dette området blir nedbøyningen oppoverrettet, som er uinteressant for denne rapportens problemstilling.

Merk at trendlinjen i dette tilfellet blir noe misvisende, dette pga «hoppene», som kommer når armeringsdiameteren øker etter økningen i P for å sikre $A_p > A_{s,min}$. Utskrift fra Python av, for eksempel, HD340 og $L = 12.2 - 12.3\text{m}$ bekrefter årsaken:

| | |
|--|---|
| $t_0 = 3$ $L = 12.2\text{ m}$ Dekke HD 340 $P = 2508.12\text{ kN}$ $A_{s,min} = 1851.27\text{ mm}^2$ $A_p = 1855.5\text{ mm}^2$ Armeringsdiameter = 7.5 mm Eksentrisitet = 115.0 mm Total tap = 22.2 % | $t_0 = 3$ $L = 12.3\text{ m}$ Dekke HD 340 $P = 2715.9\text{ kN}$ $A_{s,min} = 2038.03\text{ mm}^2$ $A_p = 2671.92\text{ mm}^2$ Armeringsdiameter = 9 mm Eksentrisitet = 106.0 mm Total tap = 27.23 % |
|--|---|

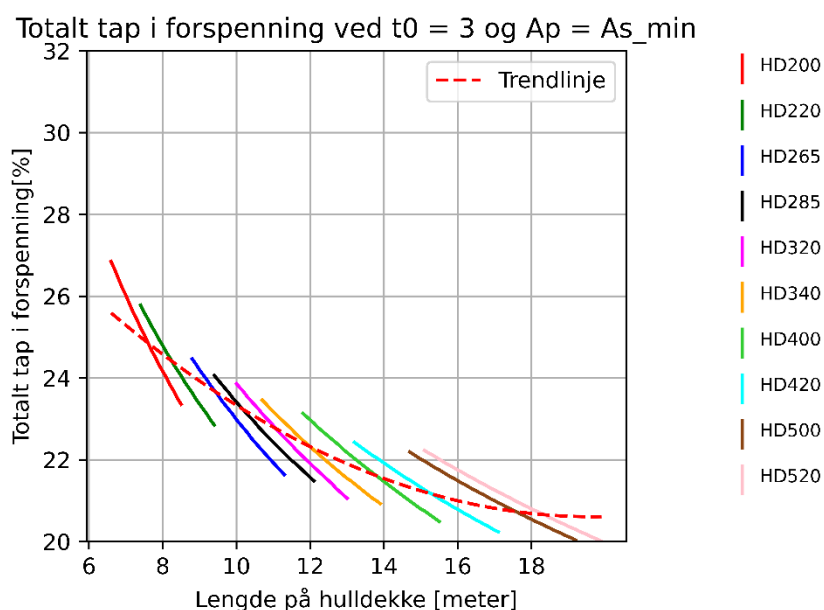
Sammenhengen som kommer fram her, er at totalt tap øker betydelig for armeringsarealer med dårligere utnyttet armeringsmengde.

Dette er også grunnen til at tapet blir så høyt for lengder under 9m. I dette området er minimumsarmeringen, i $[\text{mm}^2]$, som det er behov for i tverrsnittet, mindre enn hva den oppnåelige minstemengden med 5 kabler m/7 vaiere er. Dette skyldes en minste mulige armeringsdiameter på 5.2mm.

2.3.1.1 Total tap mot L idealisert

For å kunne redusere tap som skyldes dårlig tilnærmet A_p mot $A_{s,min}$, må armeringskabeltype undersøkes for å finne typen som kan oppnå et areal som fortsatt er større enn, men mest mulig lik, $A_{s,min}$.

Plottes grafen tilsvarende, men med armeringsmengden $A_p = A_{s,min}$, slik at tverrsnittet alltid benytter en maks utnyttet, teoretisk armering, vil andre bidrag til totaltapet bli mer synlige:



Figur 19: Totalt tap i forspenning ved $t_0 = 3$ og $A_p = A_{s,min}$ (Eget arbeid, 2023)

Ser fra grafen over at totalt tap endres vesentlig når tap grunnet $A_p \gg A_{s,min}$ blir tatt ut av beregningene. Utskrift fra Python av samme eksempelområde som tidligere viser nå følgende:

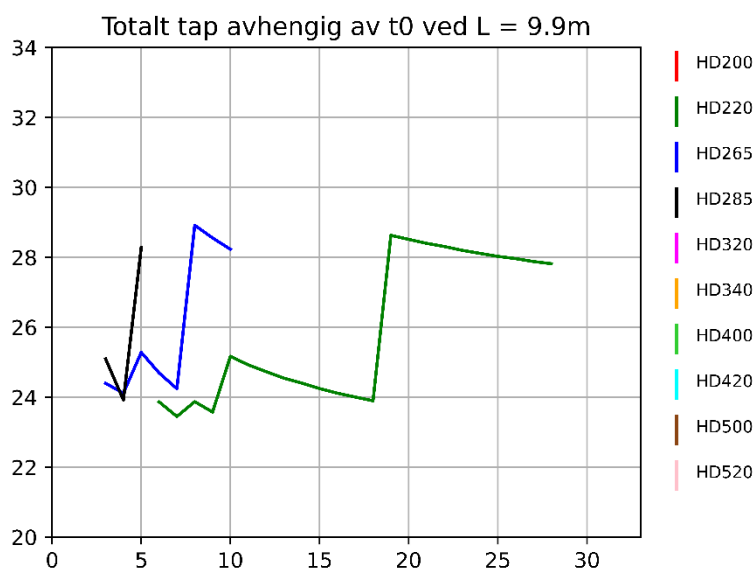
| | |
|---|---|
| $t_0 = 3$ $L = 12.2 \text{ m}$ Dekke HD 340 $P = 2508.44 \text{ kN}$ $A_{s,min} = 1851.27 \text{ mm}^2$ $A_p = 1851.27 \text{ mm}^2$ Armeringsdiameter = 7.49 mm Eksentrisitet = 115.0 mm Total tap = 22.17 % | $t_0 = 3$ $L = 12.3 \text{ m}$ Dekke HD 340 $P = 2518.93 \text{ kN}$ $A_{s,min} = 1858.06 \text{ mm}^2$ $A_p = 1858.06 \text{ mm}^2$ Armeringsdiameter = 7.51 mm Eksentrisitet = 115.0 mm Total tap = 22.09 % |
|---|---|

Utskriften bekrefter at, med maks utnyttet armeringsmengde, blir tapet redusert betydelig. Med en teoretisk armeringsdiameter 7.51mm blir tapet for dette elementet med denne lengden 22.09%, mot tidligere (virkelige) armeringsdiameter 9mm og 27.23%.

Det er interessant å merke også at tapene reduseres ved økende lengde for hvert tverrsnitt, med $\approx 3\%$ over hvert tverrsnitt, $\approx 7\%$ totalt over hele lengden. Dette viser at noen tapskilder er omvendt proporsjonale, altså minkende, med lengden.

2.3.1.2 Totalt tap mot t_0

For å undersøke effekten av økninger av t_0 på tap i et tverrsnitt, må variablene plottes annerledes enn i grafene over. Først må t_0 kjøres for alle verdier fra 3 – 28 dager. En vilkårlig, men fastsatt lengde L må settes som kontrollen skal foregå opp mot. Tverrsnittskontrollen vil med dette lagre alle tverrsnitt som fungerer (nedbøyning: $0 < \delta < L/250$) for den lengden, med den kjørte verdien av t_0 . Til slutt kan totaltapet, i prosent, for hvert tverrsnitt, kjørt på hver t_0 , plottes. Eksempelvis for $L = 9.9\text{m}$:



Figur 20: Totalt tap avhengig av t_0 ved $L = 9.9\text{m}$ (Eget arbeid, 2023)

Grafen over viser 3 tverrsnitt, HD220 – HD285, som kan benyttes over valgt lengde 9.9m. HD220 oppnår kravene første ved $t_0 = 6$ og HD285 og HD265 faller utenfor kravet om minste nedbøyning = 0mm ved hhv. $t_0 = 5$ og $t_0 = 10$.

Total tap tenderer nedover ved økninger av t_0 , men sammenhengen er for svak til å forbedre tap som skyldes dårlig utnyttet armeringsmengde. Tapsverdiene hopper vesentlig opp ved økninger av A_p . Også ift. t_0 er et godt utnyttet armeringsmengde viktigste faktor ved tapsbegrensninger.

For å kunne se hvor tapene kommer fra, og hva de skyldes, må hvert enkelt tap analyseres, både med og uten bidraget fra armeringsmengden, og etter t_0 , der det er aktuelt.

2.3.2 Umiddelbare tap

Umiddelbare tap relevant for denne rapporten er låsetap og friksjonstap. Ettersom de skjer under oppspenning, er t_0 irrelevant for verdien disse påtar seg, og er dermed litt utenfor scopet til denne rapporten. Disse tapene er også vanskeligere å gjøre noe med ift. tverrsnittsoptimalisering, men blir behandlet her for grundigheten sin del.

2.3.2.1 Låsetap mot L

Ser fra likningene beskrevet tidligere om sammenhengene som forårsaker tap pga. låsing.

Tøyningsendringen pga. låsetapet:

$$\Delta\varepsilon_{lås} = \frac{\Delta L_{lås}}{L}$$

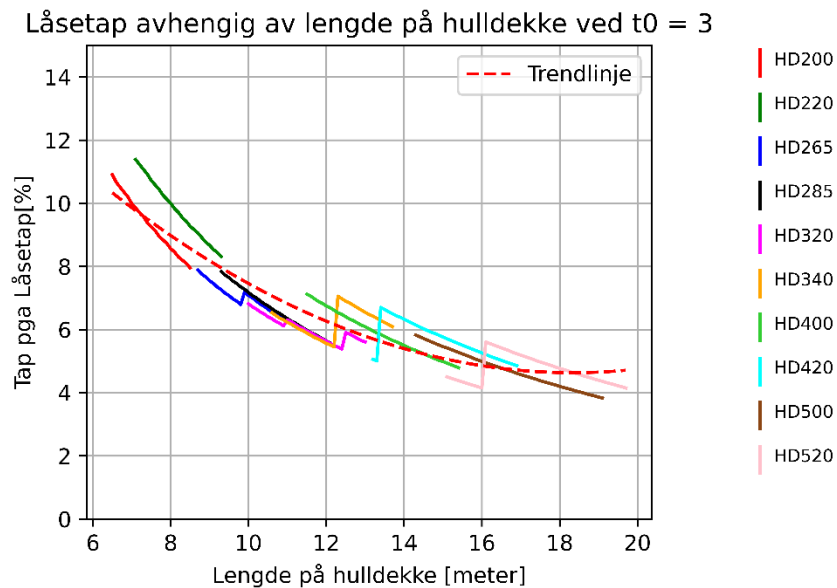
Tilhørende tøying pga oppspenningen:

$$\varepsilon_{p.0} = \frac{P_0}{E_p \cdot A_p}$$

Tap pga låsing:

$$\Delta P_{lås} = \frac{\Delta\varepsilon_{lås}}{\varepsilon_{p.0}} \cdot P_0$$

Ser herfra at tapet er både avhengig av L og A_p . Plottes tap mot L kan disse sammenhengene komme frem:



Figur 21: Låsetap avhengig av lengde på hulldekke ved $t_0 = 3$ (Eget arbeid, 2023)

Tapet pga. låsing er avtagende for økninger av L , med økninger etter økningene av armeringsdiameter.

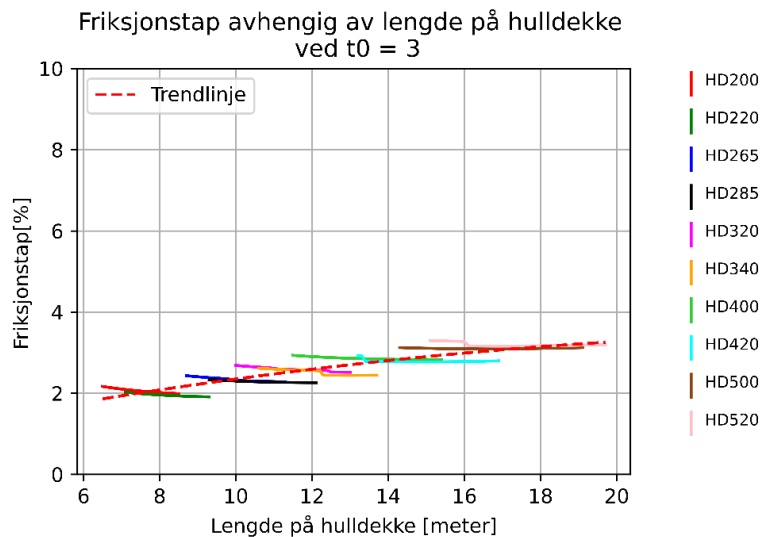
Tapet reduseres over lengden fra $\approx 10 - 4\%$. En reduksjon på 6%. Dermed kan reduksjonen på totaltapet med økende lengder av L , som beskrevet tidligere, i stor grad skyldes reduksjonen av tapet pga låsing. Størrelsen på $\Delta L_{lås}$ er konstant = 5mm. Det er rimelig å konkludere at denne er av mindre betydning jo lengre tverrsnitt benyttes.

2.3.2.2 Friksjonstap mot L

Fra likningen for friksjonstapet:

$$\Delta P_{\mu}(L) = P_0(1 - e^{(-\mu(\theta+kL))})$$

...kan det påvises at tapet er definert av både L , e_p og P_0 . Kjøres koden med friksjonstap i prosent mot lengden L , kan sammenhengene komme fram:



Figur 22: Friksjonstap avhengig av lengde på hulldekke ved $t_0 = 3$ (Eget arbeid, 2023)

Friksjonstapet øker jevnt med økninger av tverrsnittet, og dermed e_p , etter økninger av L . Ser også herfra at endringene rett etter økninger av armeringsdiameter gir et svakt, positivt bidrag til, altså en reduksjon av, friksjonstapet.

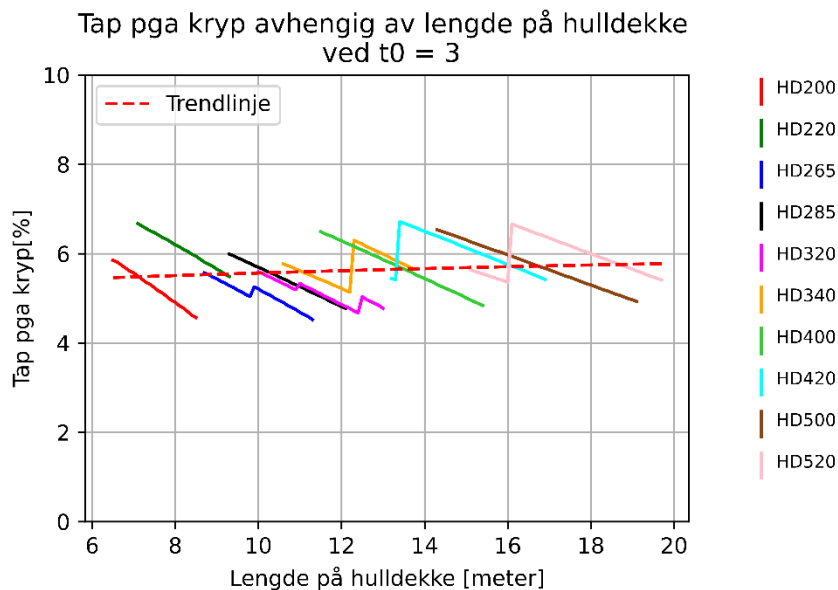
Tap pga. friksjon *minsker* altså med en mindre utnyttet armeringsmengde. Denne sammenhengen er imidlertid så svak at den kan anses som ubetydelig i optimaliseringsammenheng. Dermed kan friksjonstap anses som en økende mengde etter økende lengde.

2.3.3 Langtidstap

Langtidstap relevant for denne rapporten er tap ifb. kryp, svinn og relaksasjon. Svinn og relaksasjon er hhv. material- og spenningsavhengig, mens kryp avhenger av lastpåføringstidspunkter, samt av t_0 , og vil derfor undersøkes opp mot forskjellige verdier av t_0 , i tillegg til lengde.

2.3.3.1 Kryptap mot L

Plottes kryptap etter lengde, tilsvarende som ved totaltap, for en gitt t_0 , kan det vises hvordan tap for kryp oppfører seg etter alle tverrsnitt over alle lengder:



Figur 23: Tap pga kryp avhengig av lengde på hulldekke ved $t_0 = 3$ (Eget arbeid, 2023)

Ser her at tap pga. kryp er relativt stabile, men noe økende, over lengden, og er som forventet påvirket i større grad av armeringsutnyttelsen. Ved likningen for tapet i forspenningskraft pga kryp gitt av:

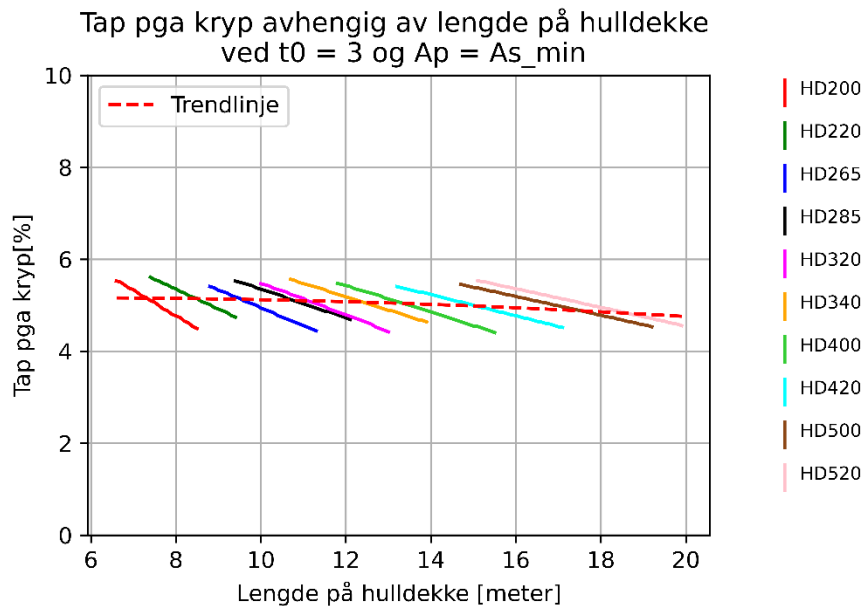
$$\Delta P_{kryp} = \Delta \sigma_{p.kryp} \cdot A_p$$

...vises det at økninger av A_p påvirker direkte verdien av tap pga. kryp. Utskrift fra Python av, eksempelvis, spennet til HD 420 mellom $L = 13.4 - 13.5$ m, bekrefter dette:

| | |
|---|---|
| <p>$t_0 = 3$ $L = 13.4$ m Dekke HD 420 $P = 3013.56$ kN $A_{s_min} = 2221.39$ mm² $A_p = 2226.6$ mm² Armeringsdiameter = 9 mm Total tap = 22.34 % Tap pga kryp = 5.38 %</p> | <p>$t_0 = 3$ $L = 13.5$ m Dekke HD 420 $P = 3284.86$ kN $A_{s_min} = 2462.48$ mm² $A_p = 3326.16$ mm² Armeringsdiameter = 11 mm Total tap = 27.86 % Tap pga kryp = 6.69 %</p> |
|---|---|

2.3.3.1 (a) Kryptap mot L idealisert

Settes grafen for kryptap opp med $A_p = A_{s,min}$ kan effekten av hoppene sees bort ifra:



Figur 24: Tap pga kryp avhengig av lengde på hulldekke ved $t_0 = 3$ og $A_p = A_{s,min}$ (Eget arbeid, 2023)

Grafen over viser at hvis grad av armeringsutnyttelse tas ut av beregningene oppnås en jevn, og idealisert, verdi for tap. De faktiske tapene vil alltid være større enn eller lik dette.

For hvert element går denne verdien ned $\approx 1\%$ for mellom nedbøyning $0 < \delta_{tot} < L/250$. Dette skyldes en nå lineært økende $A_p = A_{s,min}$, etter økningen av P . Utskrift fra Python av, eksempelvis, spennet til HD 420 mellom $L = 13.1 - 17.2\text{m}$, bekrefter dette:

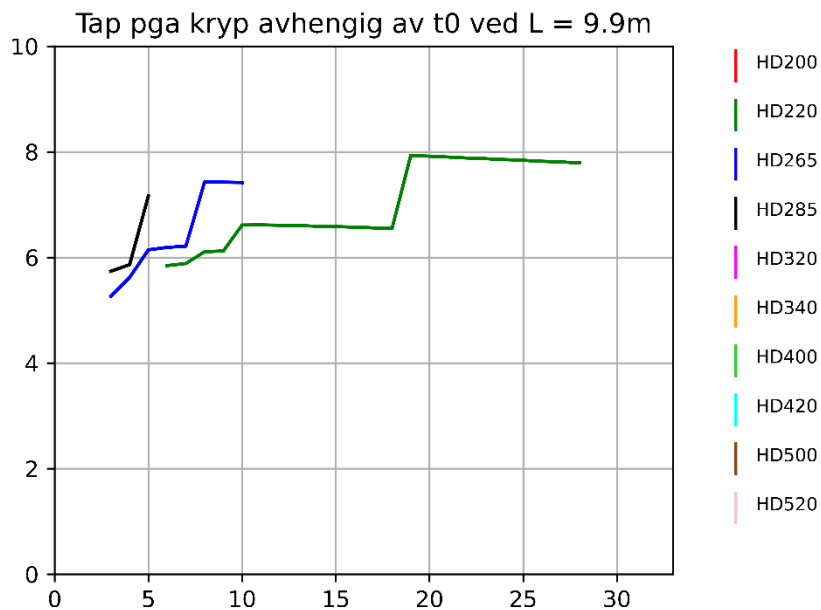
| | |
|---|---|
| $t_0 = 3$ $L = 13.1 \text{ m}$ Dekke HD 420 $P = 2977.58 \text{ kN}$ $A_{s,min} = 2197.62 \text{ mm}^2$ $A_p = 2197.62 \text{ mm}^2$ Armeringsdiameter = 8.94 mm Total tap = 22.5 % Tap pga kryp = 5.44 % | $t_0 = 3$ $L = 17.2 \text{ m}$ Dekke HD 420 $P = 3484.78 \text{ kN}$ $A_{s,min} = 2537.18 \text{ mm}^2$ $A_p = 2537.18 \text{ mm}^2$ Armeringsdiameter = 9.61 mm Total tap = 20.19 % Tap pga kryp = 4.5 % |
|---|---|

Merk at armeringsdiameterene her er fiktive størrelser for å oppnå $A_p = A_{s,min}$. Økningen i P kommer fra økningen av momentet fra egenvekten, M_{egen} , pga. økningen i lengde:

$$M_{egen} = \frac{g_{1,egenvekt} \cdot L^2}{8}$$

2.3.3.2 Kryptap mot t_0

Plottes tap pga. kryp mot t_0 , for en gitt lengde, kan det undersøkes etter sammenhenger mellom kryptap og t_0 :



Figur 25: Tap pga kryp avhengig av t_0 ved $L = 9.9$ (Eget arbeid, 2023)

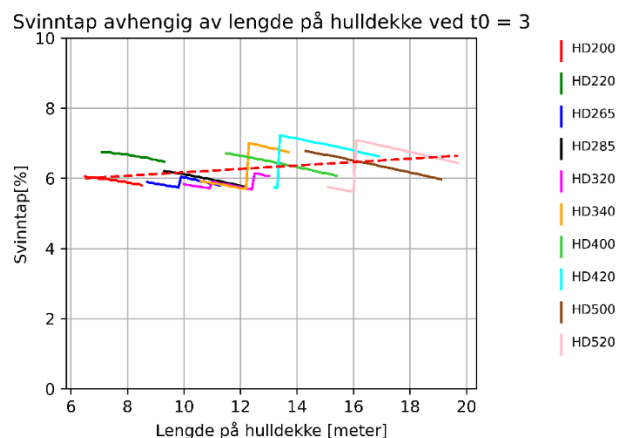
Grafen over viser kryptap avhengig av t_0 for aktuelle tverrsnitt av eksempel lengde 9.9m. Sett bort fra økninger av tap pga. økninger av armeringsdiameter, viser grafen avtakende verdier for kryptapet. Viktigste faktor for å redusere tap grunnet kryp er fortsatt armeringsmengde som best mulig tilnærmer $A_p = A_{s,min}$, også mhp. t_0 .

2.3.3.3 Svinntap mot L

Ser fra likning for tap av forspenningskraft P som følge av svinn:

$$\Delta P_{svinn} = \Delta \sigma_{p,svinn} \cdot A_p$$

...at tap på grunn av svinn vil også ha en sterk sammenheng med armeringsmengden. Plottes tap i prosent pga svinn mot lengden for alle tverrsnitt:

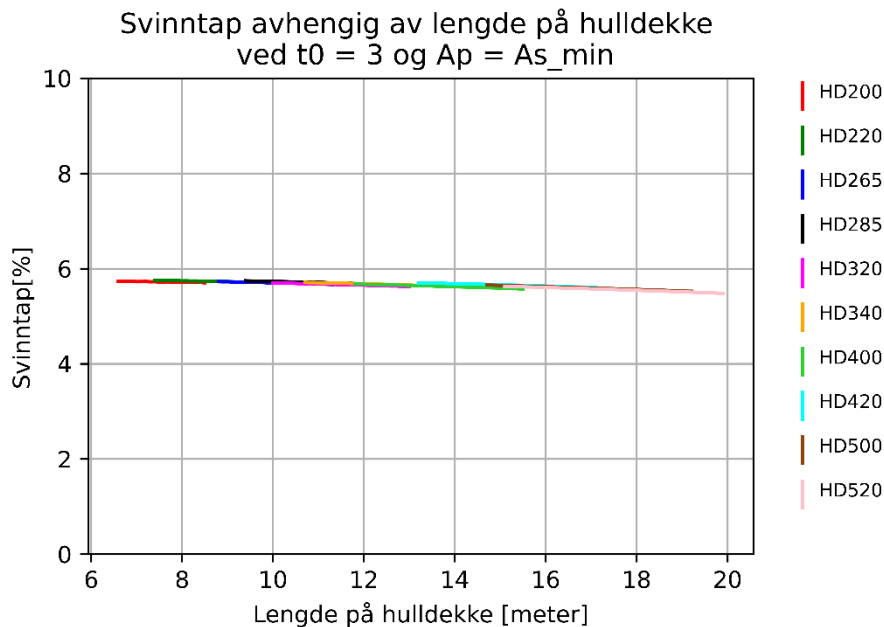


Figur 26: Svinntap avhengig av lengde på hulldekke ved $t_0 = 3$ (Eget arbeid, 2023)

Grafen over viser at hopp i svinntapsmengder fra økninger i armeringsmengde tilsvarer endringer på $\approx 2\%$.

2.3.3.3 (a) Svinntap mot L idealisert

For å se hvordan svinntap oppfører seg uten påvirkning fra armeringen, plottes grafen igjen, med $A_p = A_{s,min}$:



Figur 27: Svinntap avhengig av lengde på hulldekke ved $t_0 = 3$ og $A_p = A_{s,min}$ (Eget arbeid, 2023)

Her er det tydelig at svinntap uten hensyn på armeringsutnyttelsen er relativt konstant, litt minkende etter tverrsnittsstørrelsen. Dette skyldes større verdier av A_t og I_t , for større tverrsnitt, i likningen for endring av tøyning i forspenning pga. svinn:

$$\varepsilon_{c,s}(e) = \varepsilon_{cs} + \frac{N_s}{E_{middel} \cdot A_{t,krypp}} + \frac{M_s}{E_{middel} \cdot I_{t,krypp}} \cdot (e_p - y_{t,krypp})$$

Denne sammenhengen er imidlertid for svak til å være relevant for optimalisering.

Dette svinntapet kan anses som idealisert, det faktiske tapet vil alltid være større enn eller lik dette, for de gjeldende antatte parameterne relativ luftfuktighet, betongtype og sementklasse.

Dermed er kun størst mulig utnyttelse av armeringen relevant for optimaliseringer av tverrsnitt mhp. tap pga. svinn.

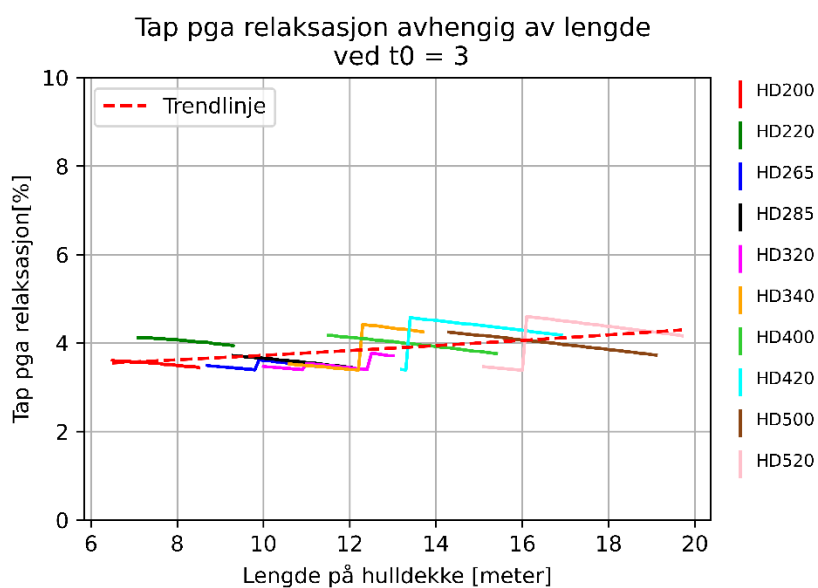
2.3.3.4 Relaksasjonstap mot L

Ser fra likningene for relaksasjonstap:

$$\Delta\sigma_{pr} = \sigma_{pi} \cdot 0.66 \cdot \rho_{1000} \cdot e^{9.1\mu} \cdot \left(\frac{t}{1000}\right)^{0.75(1-\mu)} \cdot 10^{-5}$$

$$P_{tap,relaksasjon} = -\Delta\sigma_{pr} \cdot A_p$$

...at tap i forspenning pga svinn har en direkte sammenheng med armeringsmengde og påført spenning. Påført spenning er avhengig av påført forspenningskraft og armeringsmengde. Gitt dette er det rimelig å anta at tap pga. relaksasjon vil være relativt stabilt, med økninger i tap etter økninger i armeringsmengde. Plottes tapet tilsvarende som de andre:

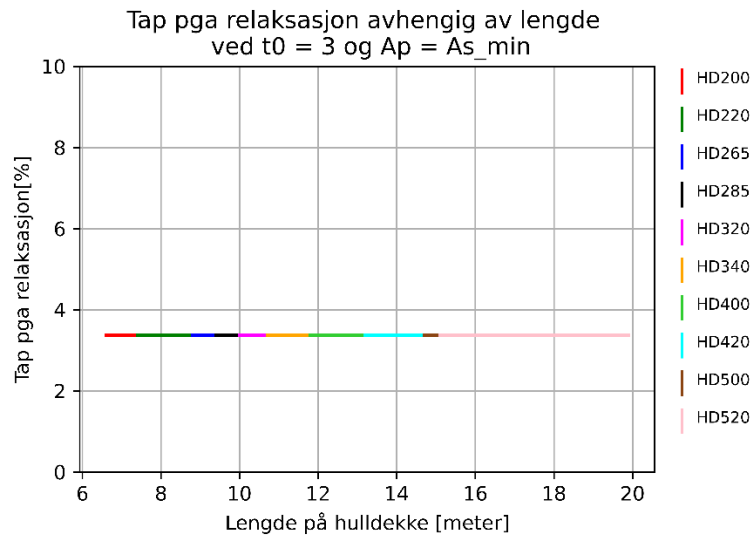


Figur 28: Tap pga relaksasjon avhengig av lengde ved $t_0 = 3$ (Eget arbeid, 2023)

Som forventet er tapet stabilt, med hopp etter armeringsendringer tilsvarende de andre langtidstapene.

2.3.3.4 (a) Relaksasjonstap mot L idealisert

Settes $A_p = A_{s,min}$ kan dette tapet vises uten hensyn til armeringsutnyttelse:



Figur 29: Tap pga relaksasjon avhengig av lengde ved $t_0 = 3$ og $A_p = A_{s,min}$ (Eget arbeid, 2023)

Relaksasjonstapet med konstant fullt utnyttet armeringsmengde gir altså et idealisert tap på $\approx 3.3\%$. Dette er som forventet etter hvordan relaksasjonstap er definert.

Relaksasjon i spennstål er kun avhengig av spenning og armeringsmengde, ikke av t_0 . For reduksjon av relaksasjonstap er best tilnærmede $A_p = A_{s,min}$ eneste justerbare faktor.

2.3.4 Konklusjon av tapsanalyse

Gjengangeren i tapsanalysen er viktigheten av størst mulig armeringsutnyttelse i tverrsnittet. Tapsreduksjoner på inntil 5.5% kan oppnås i forhold til rapportens definerte parametere. Økninger av t_0 viste en positiv effekt på tap, men ikke mere enn det negative bidraget fra A_p .

2.4 Nedbøyningsanalyse

Denne delen av rapporten vil se på nedbøying som dimensjoneringskriterie. Vanligvis er det nedbøying som blir dimensjonerende ved dimensjonering av hulldekkesystemer. Rapporten kommer til å se på hvordan nedbøying er definert, hva som forårsaker det, og påvirker det, og sammenhengen mellom t_0 og langtidsnedbøyinger.

2.4.1 Nedbøyningsårsaker

Som beskrevet tidligere i rapporten er totale langtidsnedbøyingen et resultat av nedbøyningsbidragene fra lastene og forspenningen, uttrykt som:

$$\delta_{tot} = \delta_{qEd} + \delta_{forsp}$$

Der δ_{qEd} og δ_{forsp} kan utvides til:

$$\delta_{tot} = \frac{5 \cdot q_{Ed} \cdot L^4}{384 \cdot E_{middel} \cdot I_{t.L}} + \frac{5 \cdot P_{endelig} \cdot e_p \cdot L^2}{48 \cdot E_{middel} \cdot I_{t.L}}$$

...fra hhv. likningene for nedbøyning av en fritt opplagt bjelke og likningen for nedbøyning skapt av en parabolisk forspenningsprofil uten endepunktseksentrisiteter og maks eksentrisitet, e_p , på midten.

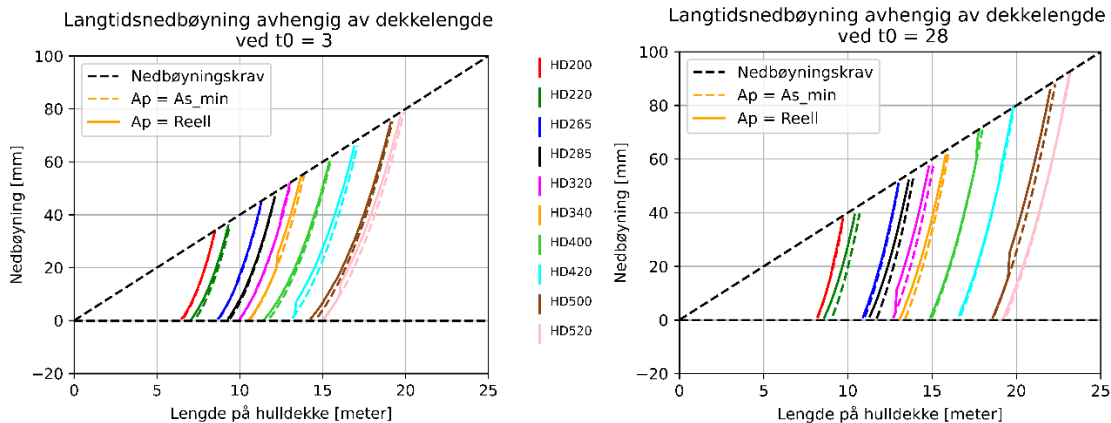
2.4.2 Litt om grafene i nedbøyningsanalysen

Alle variablene i uttrykket over, unntatt E_{middel} og $I_{t,L}$ varierer etter hulldekkens lengde, mens de siste to er avhengig av t_0 og tverrsnitt. Verdien for $P_{endelig}$ er avhenger også av verdien for totaltapet, som er i stor grad avhenger av tilpasningen på $A_p \geq A_{s,min}$. Denne faktoren er inkludert her, ved at langtidsnedbøyningen plottes både med A_p bestående av virkelige armeringsdiametere, med heltrukne linjer, og $A_p = A_{s,min}$, for perfekt tilpasning, med stiplede. På denne måten kan effekten av dette tapet undersøkes, ihht. rapportens gitte parametere og definisjonsområde.

Likningen plottes, slikt som grafene i tapsanalysen, for hvert tverrsnitt over lengden L . Definisjonsområdet er, også som tidligere, satt mellom $0 < \delta_{tot} < L/250$, der hver linje, heltrukket og stiplet, representerer et tverrsnitt.

2.4.3 Nedbøyning mot L avhengig av t_0

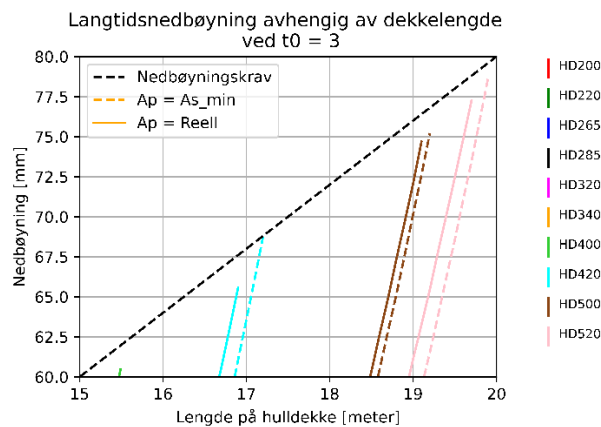
Plottes nedbøyning mot L for alle tverrsnitt, som beskrevet over, for $t_0 = 3$ dager og $t_0 = 28$ dager, kan grensene av definisjonsområdet, avhengig av t_0 , undersøkes samtidig:



Figur 30: Langtidsnedbøyning avhengig av dekkelengde ved $t_0 = 3$ & $t_0 = 28$ (Eget arbeid, 2023)

Grafene over viser at maks lengde på et tverrsnitt øker betraktelig ved økning av t_0 . Maks lengde for tverrsnitt øker fra $\approx 20\text{m}$ til $\approx 26\text{m}$ for t_0 fra 3 – 28 dager. Dette medfører muligheten for lengre maks spennvidde av alle tverrsnitt.

På tross av tapsbidraget fra dårlig tilnærming av A_p funnet tidligere, viser grafen at nedbøyningsforbedringer ved $A_p = A_{s,min}$ utgjør i praksis veldig lite for verdien av endelig nedbøyning. En forstørrelse av grafen i området viser den faktiske forbedringen:



Figur 31: Langtidsnedbøyning avhengig av dekkelengde ved $t_0 = 3$, forstørret (Eget arbeid, 2023)

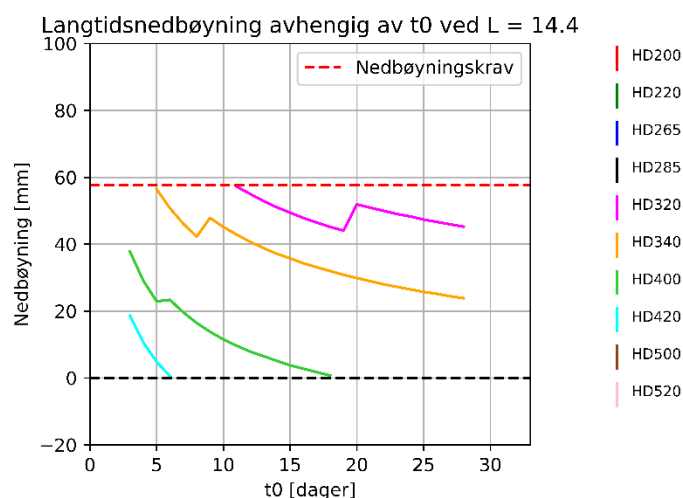
På det beste utgjør dette $\approx 1.5\text{mm}$ mindre nedbøyning, eller $\approx 0.25\text{m}$ lengre spenn. Dette gir mening pga. de verste områdene for økt tap etter dårlig tilpasning, kun foregår i nøyaktig dette området, for dette tverrsnittet, på denne lengden, og blir forbedret etter hvert.

Denne forskjellen i nedbøyning eller spennvidde anses av rapporten som ubetydelig. Spesielle hensyn må tas angående dette kun i svært spesifikke områder. Likevel anses det at god tilpasning av A_p er viktig av miljøhensyn, som vil bli behandlet i 3.2 Miljøpåvirkning.

Alternativt til økte spennvidder kan denne informasjon brukes til å redusere tverrsnittshøyden for en gitt lengde.

2.4.4 Nedbøyning mot t_0 avhengig av L

Plottes nedbøyningen mot en gitt lengde kan optimaliseringsmulighetene mhp. redusert tverrsnittsstørrelse undersøkes for den gitte lengden. Ser på eksempelvis $L = 14.4\text{m}$:



Figur 32: Langtidsnedbøyning avhengig av t_0 ved $L = 14.4\text{m}$ (Eget arbeid, 2023)

Fra denne grafen kan det vises at, for et spenn på f.eks. 14.4m, er HD420 og HD400 tilgjengelige dimensjoner ved $t_0 = 3$, og havner utenfor definisjonsområdet på hhv. $t_0 = 6$ og 17. Ved $t_0 = 5$ og 11 blir det mulig å benytte hhv. tverrsnitt HD340 og HD320.

Dette vil si at med en herdetid økt fra 3 til 11 dager kan tverrsnittshøyden reduseres fra, for eksempel, HD400 til HD320. En reduksjon på 80mm. Dette kan være en viktig optimalisering mtp. miljøhensyn. Utledning av miljøpåvirkninger blir beskrevet senere i rapporten.

For dimensjonering mtp. t_0 på denne måten kan ønsket lengde legges inn i programmet, for å få ut tilsvarende graf for den lengden. Da kan valg av dekkestørrelse tas etter mulig t_0 prosjektet tåler.

For å kunne sikre at optimaliserte tverrsnittsdimensjoner fortsatt er mulige, må de undersøkes ihht. ytterligere krav som kan bli dimensjonerende.

2.5 Ytterligere krav

Rapporten vil nå se på noen ytterligere krav for å sikre at optimalisering mtp. t_0 er realistisk oppnåelig. Inkludert i rapporten er krav ihht. brann, vibrasjon og resonans, isolasjon, varme og lyd og jordskjelv.

2.5.1 Brann

Sintef Byggforsk deler inn brannklasse i tre klasser, etter kriterier vedrørende personoppholdsmengde, overnatting, rømningsveier, etc. samt risikoklasser 1 – 6 avhengig av konsekvensomfang ved en evt. brann.

Kontorbygninger har risikoklasse 2, med brannklasse 1, 2 og 3 etter hhv. 3 etasjer, 4 – 5 etasjer, og over 5 etasjer. Brannklassen bestemmer hvilket krav stilles til de enkelte konstruksjonsdeler. Tabell 43 i Byggforsk 321.022 viser kravene for noen bygningsdeler:

Tabell 43
Bærende bygningsdeler brannmotstand, avhengig av bygningens brannklasse

| Bygningsdel | Bkl. 1 | Bkl. 2 | Bkl. 3 |
|---|------------------|-----------------------|--------------------------------|
| Bærende bygningsdeler | R 30 | R 60 | R 90 A2-s1,d0 ¹⁾ |
| Trappeløp | Ingen krav | R 30 | R 30 A2-s1,d0 |
| Bærende bygningsdeler under øverste kjeller | R 60 A2-s1,d0 | R 90 A2-s1,d0 | R 120 A2-s1,d0 |
| Utvendig trappeløp ²⁾ | Ingen krav | R 30 eller ubrennbart | Ubrennbart |

¹⁾ Sekundære, bærende bygningsdeler, etasjeskillere og takkonstruksjoner som ikke er en del av hovedbæresystemet eller er stabiliserende, kan være R 60 A2-s1,d0. Betegnelsen A2-s1,d0 betyr at bygningsdelen må være av ubrennbart materiale.

²⁾ Forutsettes beskyttet mot flammer og strålevarme

Tabell 6: Tabell 43 i Sintef Byggforsk. Bærende bygningsdeler brannmotstand (Sintef Byggforsk, 2017)

Brannmotstand i konstruksjonsdeler i bygg gis på formen REI M [min] etter konvensjon gitt av Euroklassesystemet. Hver bokstav betegner en kriterie, og [min] er antall minutter motstand ift. de gitte kriteriene.

- R - Bæreevne
- E - Integritet
- I - Isolasjonsevne
- M - Mekanisk motstandsevne (ikke relevant for hulldekker)

Bæreevne R betegner konstruksjonsdelens evne til å beholde bæreevnen og stabilitet, integritet E vil si at bygningsdelen er så tett at brann ikke smitter gjennom, og isolasjonsevnen I setter krav til varmegjennomgang, alle gjeldende for antallet minutter beskrevet.

For denne rapporten som ser på tilfellet kontorbygg under 5 etasjer, gjelder brannmotstandsklasse REI 60 eller bedre.

2.5.1.1 Materialklasser ved brann

Betongelementboka klassifiserer alle materialer etter ulike klasser ved reaksjon til brann. Disse klassene er brennbarhet, røykutvikling og brennende dråper. På grunn av betongens gode kvaliteter når det kommer til brannmotstand dimensjonereres det ved bruk av de høyeste klassifiseringene i hver av klassene (Betongelementforeningen, 2018):

| Materiale | Brannreaksjoner | | |
|-----------|-------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| | Brennbarhet (A1 – F) | Røykutvikling (s1 – s3) | Brennende dråper (d0 – d2) |
| Betong | A1 | s1 | d0 |

Tabell 7: Betongs brannmotstandsklasser (Betongelementforeningen, 2018)

Hulldekkeelementer er dermed godkjent som materiale for konstruksjonsdeler i alle brannklasser 1 – 3, gitt i tabell 43.

2.5.1.2 Brannmotstand i hulldekker

Standard brannmotstand i hulldekker finnes oppgitt i tabell D 4.1 fra Betongelementboka:

| Standard brannmotstand | Krav til minste dimensjoner (mm) | |
|------------------------|---|----------------------------------|
| | Ekvivalent dekketykkelse h_{ekv} (mm) | Armeringsdybde for spenntau (mm) |
| REI 30 | 60 | 25 |
| REI 60 | 80 | 35 |
| REI 90 | 100 | 45 |
| REI 120 | 120 | 55 |
| REI 180 | 150 | 70 |
| REI 240 | 175 | 80 |

Tabell 8: Tabell D 4.1 fra Betongelementboken (Betongelementforeningen, 2017)

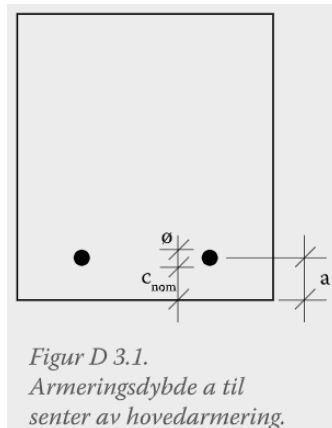
Der h_{ekv} er gitt som:

$$h_{ekv} = \frac{Areal}{Bredde}$$

Og armeringsdybden, for dette tilfellet gitt som a :

$$a_{HDXXX} = c_{min,b}$$

Etter Figur D 3.1 fra Betongelementboka:



Figur 33: D 3.1 Armeringsdybde til senter av hovedarmering (Betongelementforeningen, 2017)

Der:

$$c_{min,b} = c_{nom} + \frac{\varphi}{2}$$

Denne tabellen er lagt inn i Python, som en liste, som koden enkelt kan regne ut og finne verdien for standard brannmotstand for et gitt HD-tverrsnitt:

```
motstand = [{"rei": 30, "hekv": 60, "dybde": 25}, {"rei": 60, "hekv": 80, "dybde": 35}, {"rei": 90, "hekv": 100, "dybde": 45}, {"rei": 120, "hekv": 120, "dybde": 55}, {"rei": 180, "hekv": 150, "dybde": 70}, {"rei": 240, "hekv": 175, "dybde": 80}]
```

Utdrag fra vedlegg 3: Pythonkode

Gitt på denne måten kan koden lages slik at Python kan kontrollere mot, eller hente ut, hvilken som helst verdi fra denne listen. Dette vil bli nyttig i neste del for justert brannmotstandsklasse, der verdien for a , «dybde» i denne listen, vil bli kontrollert mot.

2.5.1.3 Justert brannmotstand i dekker

Betongelementboka D 4.1 viser en beregningsmetode for oppgradering av brannmotstandsklasse, gitt etter en justert armeringsdybde når det er tatt hensyn til utnyttelsen av spennarmeringen.

Først finnes indre momentarm i tverrsnittet, z , gitt av:

$$z = \frac{h - z_c}{2} + e_p$$

Deretter dimensjonerende strekkapasitet pr. spenntau:

$$F_p = \frac{A_p}{\text{antall_kabler}} \cdot \frac{f_{p0,1k}}{\gamma_s}$$

Der $\gamma_s = 1.15$.

Fra dette finnes dimensjonerende kapasitet av spennarmeringen, S_d :

$$S_d = \text{antall_kabler} \cdot F_p$$

...og dimensjonerende momentkapasitet, M_d :

$$M_d = S_d \cdot z$$

Denne kontrolleres mot M_{Ed} , tidligere definert som:

$$M_{Ed} = \frac{q_{Ed} \cdot L^2}{8}$$

Hvis kontrollen finner at:

$$M_{Ed} < M_d$$

...kan beregningen fortsette. Først settes h_{ekv} etter gitt HD-element:

$$h_{ekv,HDXXX} = \frac{A_{HDXXX}}{\text{Bredde}}$$

Merk at h_{ekv} regnes ut med A_{HDXXX} uten påstøpet, ettersom h_{ekv} gjelder kun for bærende del av konstruksjonen.

For å være godkjent for økt brannmotstand etter tabell D 4.1 i Betongelementboken må verdiene for h_{ekv} og armeringsdybden a for spenntau være \geq minsteverdiene gitt i tabellen. Armeringsdybden a kan justeres, og er ofte avgjørende faktor.

For å justere armeringsdybden finnes først aktuelle fordelt lastkombinasjon for brann:

$$q_{Ed,fi} = g_{1.1} + g_{1.2} + \psi_2 \cdot g_2$$

Der $\psi_2 = 0.3$ etter tabell NA.A1.1 (CEN, 2008).

Lasteffekten i ulykkestilstand brann er gitt ved momentet $M_{Ed,fi}$:

$$M_{Ed,fi} = \frac{q_{Ed,fi} \cdot L^2}{8}$$

Dimensjonerende strekkapasitet for spenntau ved tid $t = 0$, start av brann, og temperatur $\theta = 20^\circ\text{C}$:

$$f_{d,fi}(20^\circ\text{C}) = \frac{f_{p0,1k}}{\gamma_{s,brann}} = \frac{1700}{1,0} = 1700 \text{ MPa}$$

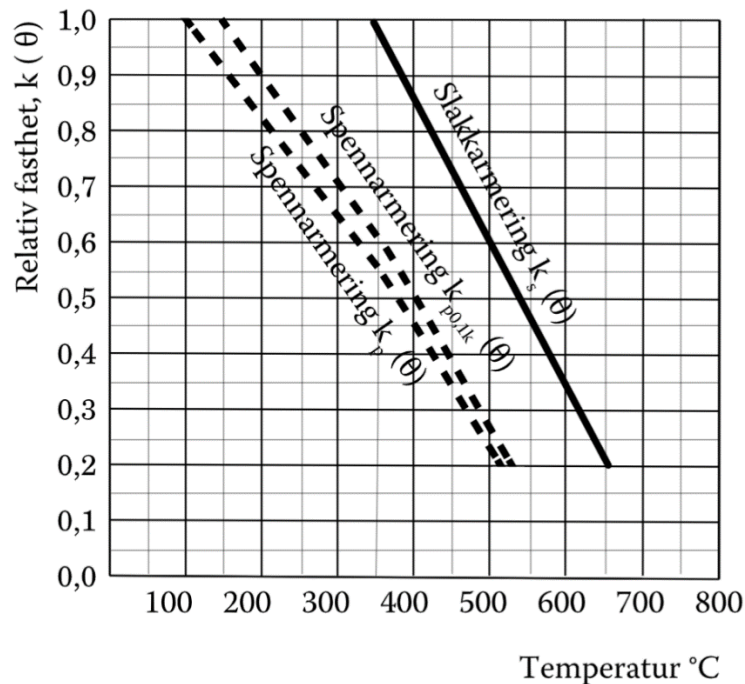
Som gir momentkapasitet $M_{d,fi}$ ved $t = 0$:

$$M_{d,fi} = f_{d,fi}(20^\circ\text{C}) \cdot A_p \cdot z$$

Som til slutt gir utnyttelsen i ulykkesgrensetilstanden brann ved utbrudd μ_{fi} :

$$\mu_{fi} = \frac{M_{Ed,fi}}{M_{d,fi}}$$

Verdien μ_{fi} brukes deretter i tabell D3.2, relativ fasthet som funksjon av temperatur for slakkarmering og spennarmering:



Figur 34: D 3.2 fra Betongelementboken (Betongelementforeningen, 2017)

Verdien av μ_{fi} finnes igjen på tabellens y-akse, for så å finne temperaturen θ_{krit} , som tilsvarer utnyttelse μ_{fi} . Merk at figuren definerer et område $1.0 > \mu_{fi} > 0.2$. Verdier utenfor dette område betyr at tverrsnittet *ikke* oppnår kravene for økning av brannmotstandsklasse, og beholder dermed opprinnelige verdi ihht. tabell D 4.1.

For å forenkle programmeringsprosessen er aktuell linje i grafen over tilnærmet i Geogebra, for å enkelt kunne sette inn μ_{fi} og få ut verdien av θ_{krit} i Python.

Likningen for linja fra Geogebra:

$$\theta_{krit}(\mu_{fi}) = -140.625 \cdot \mu_{fi}^2 - 300 \cdot \mu_{fi} + 590.625$$

Finner fra dette verdi for justert armeringsdybde gitt av:

$$\Delta a = 0.1 \cdot (\theta_0 - \theta_{krit})$$

Der $\theta_0 = 350^\circ\text{C}$, etter punktet der spennarmeringen oppnår en relativ fasthet μ_{fi} på 0.6, etter anvisning i Betongelementboka D 3.3 (Betongelementforeningen, 2007).

Justert og dimensjonerende armeringsdybde blir da gitt som:

$$a_{min} = a + \Delta a$$

Denne nye verdien, a_{min} , settes inn i en egen liste i Python:

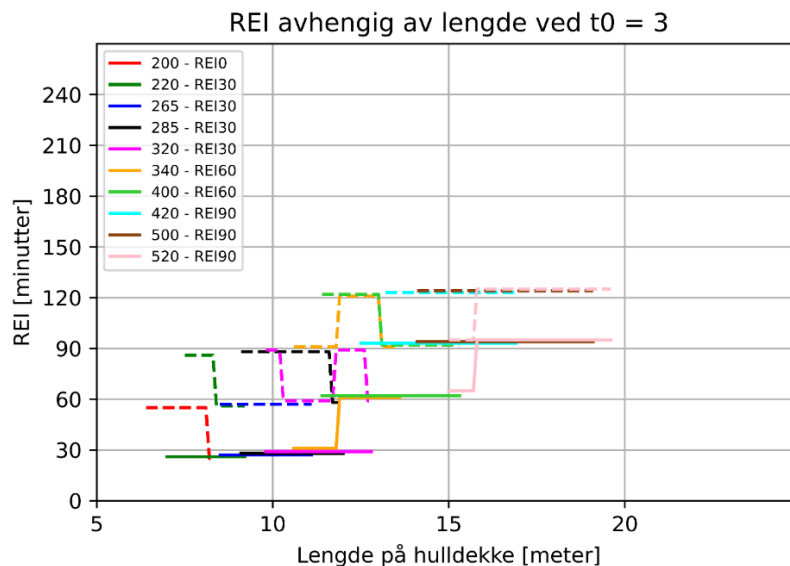
```
motstand_justert = [{"rei": 30, "hekv": 60, "dybde": 0},  
{"rei": 60, "hekv": 80, "dybde": 0},  
{"rei": 90, "hekv": 100, "dybde": 0},  
{"rei": 120, "hekv": 120, "dybde": 0},  
{"rei": 180, "hekv": 150, "dybde": 0},  
{"rei": 240, "hekv": 175, "dybde": 0}]
```

Utdrag fra vedlegg 3: Pythonkode

Merk at verdien «0» for «dybde» i denne listen ligger som en plassholder. Verdien utregnet for a_{min} settes inn, og koden kan sammenligne denne listen mot listen laget etter tabell D 4.1, og oppdatere verdien for REI [min], dersom mulig.

2.5.1.4 Kontroll av brannkrav mot L

Med definisjoner og beregningsgangen på plass kan tverrsnittenes justerte og ujusterte brannmotstandsklasse beregnes og plottes i Python, etter økende lengder. Grafen er fortsatt fargekodet etter tverrsnittsstørrelse, som tidligere, med heltrukne og stiplede linjer for hhv. ujustert og justert brannmotstandsklasse:



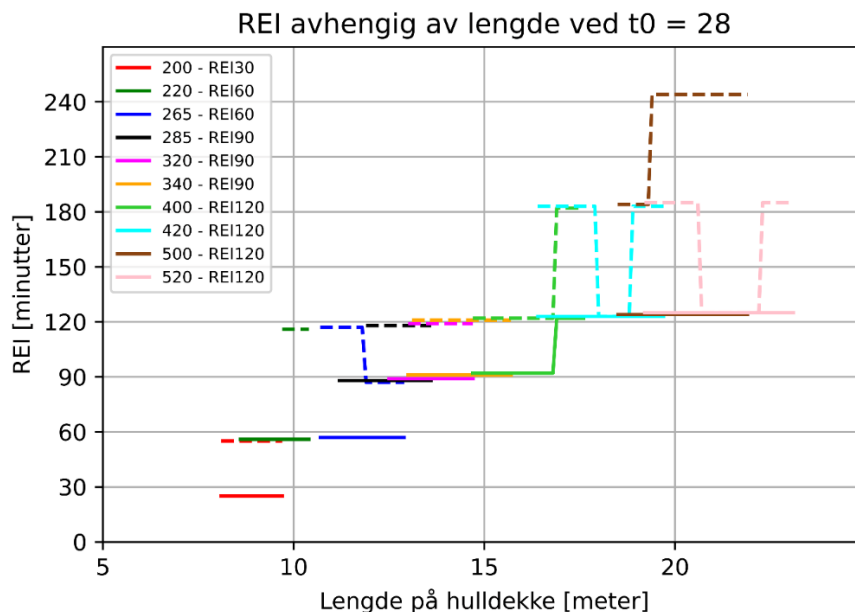
Figur 35: REI avhengig av lengde ved $t_0 = 3$ (Eget arbeid, 2023)

Merk at linjene ligger forskjøvet ift. y-aksen. Dette er gjort kun av visuelle hensyn, for å unngå overlappende linjer og påfølgende vanskeligheter med tolkningen. Tverrsnittene ligger fordelt over og under grid-linjene, slik at oppnådd brannmotstandsklasse ligger alltid ved nærmeste grid-linje for en gitt plottet linje.

Som tidligere benytter grafen seg av et definisjonsområde gitt av nedbøyning $0 < \delta_{tot} < L/250$ med maks påsatt forspenningskraft og maks eksentrisitet, etter tverrsnittenes toleransegrenser.

Tverrsnittenes ujusterte brannmotstandsklasse er lagt til i tabellen øverst til venstre, for enkel referanse.

Tverrsnittenes brannmotstandsklasse øker etter størrelsen. For å undersøke effekten av økninger av t_0 på oppnådd brannmotstandsklasse, plottes samme graf som over, med $t_0 = 28$:



Figur 36: REI avhengig av lengde ved $t_0 = 28$ (Eget arbeid, 2023)

Ved økning av t_0 til 28 dager følger en økning av både tverrsnittenes maks lengder, og økning av tverrsnittenes oppnådde justerte og ujusterte brannmotstandsklasse (unntatt HD200). Dette medfører at økninger av t_0 , etter rapportens problemstilling, ikke medfører negative innvirkninger på brannmotstandsklasse, etter parameterne gitt.

Områder som ikke inkluderer justerte verdier, viser der kravene ikke ble oppnådd. Dette skjer pga. $M_{Ed} < M_d$ ikke bli opprettholdt, eller at verdien for μ_{fi} havner utenfor definisjonsområde gitt av figur D 3.2, og tverrsnittet beholder opprinnelige verdi.

For å sikre brannmotstandskrav etter tabell 43, for brannklasse 2 (Sintef Byggforsk, 2017), vil krav til brannmotstandsklasse undersøkes på nytt i 3.1.4.1 *Brannkrav*, i 3.1 *Optimalisering*.

2.5.1.5 Konklusjon brann

Tverrsnittenes branntekniske egenskaper påvirkes både av tverrsnittsstørrelse, og av t_0 , etter rapportens parametere. Dette medfører at økninger av t_0 , mhp. optimalisering for nedbøyning, også gir en positiv effekt på elementenes branntekniske egenskaper. Dette betyr at optimaliserte tverrsnitt oppnår samme de samme, eller bedre, branntekniske egenskaper som ikke-optimaliserte.

Dette gir mening, ettersom forspenningskraften på elementene er definert til alltid å være maks etter tverrsnittenes toleransegrenser. Større forspenningskraft medfører større armeringsbehov, som krever større minimumsverdeknning, som medfører mindre eksentrisitet, dermed større armeringsdybde a .

Dette må undersøkes videre, etter parameterendringene som kommer i 3.1 *Optimalisering*.

2.5.1.5 (a) Litt om virkelige tilfeller

For faktiske branntekniske dimensjoneringer hadde en minimums REI [min] vært ønsket. Disse grafene kunne blitt brukt til å finne aktuelle tverrsnitt, men kun på bakgrunn av parameterne definert tidligere. Ved forskjeller må dette regnes ut på nytt.

For å forbedre et tverrsnitts branntekniske evner generelt, hadde f. eks en mulighet vært å øke minimums overdekning, som nevnt over. Det finnes også andre metoder som bruk av brannhemmende plater i himling, brannhemmende maling, vermiculite-spray, PP-fiber behandling av betong (for tunneler o.l.), m.m.

Alternative metoder for økning av tverrsnitts branntekniske evner er imidlertid utenfor scopet på denne rapporten.

2.5.2 Vibrasjon og resonans

Dimensjonering av betongdekker for vibrasjonspåkjenninger skjer ved å se på dekkets laveste resonansfrekvens. Det er denne som gir største respons ved vibrasjonspåkjenninger (Betongelementforeningen, 2020).

Tabell C 1.10 viser typiske laveste resonansfrekvenser for hulldekker ment til bruk som en første overslagskontroll:

| Spennvidde, l (m) | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
|-------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| HD 200 | 12 | 9 | 7 | 5 | 4 | 4 | 3 | | | | | |
| HD 220 | 13 | 10 | 8 | 6 | 5 | 4 | 3 | | | | | |
| HD 265 | | 12 | 9 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | | | | |
| HD 285 | | 13 | 10 | 8 | 6 | 5 | 4 | 4 | 3 | | | |
| HD 320 Bolig | | 14 | 11 | 9 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | | | |
| HD 320 | | | 11 | 9 | 7 | 6 | 5 | 4 | 4 | 3 | | |
| HD 340 | | | 12 | 10 | 8 | 6 | 5 | 4 | 4 | 3 | | |
| HD 400 | | | | 11 | 9 | 7 | 6 | 5 | 5 | 4 | 3 | |
| HD 420 | | | | 12 | 10 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 4 | 3 |
| HD 500 | | | | | 11 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 4 |
| HD 520 | | | | | 11 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 4 |

Tabell 9: C 1.10. Resonansfrekvenser for typiske hulldekker [Hz] (Betongelementboken, 2020)

Hulldekkene skal, i dette tilfellet, være i et kontorbygg som betyr at største bidraget til vibrasjon i betongen vil være gangtrafikken i bygget. Dimensjonerende verdi for grunnfrekvens grunnet gangtrafikk er satt til 2.6Hz. Anbefalingene for beregning av resonansfrekvens tilsier at dekket da bør ha en resonansfrekvens større enn to ganger grunnfrekvensen, altså 5.2Hz.

Likevel skriver Betongelementforeningen om dette at:

«Erfaring med hulldekker i boliger, kontor og kjøpesenter – som bare utsettes for normale personaktiviteter – viser at slike aktiviteter ikke tilfører tunge betongkonstruksjoner nok energi til at disse kravene er relevante. Det anbefales heller et minstekrav på 3 Hz.»

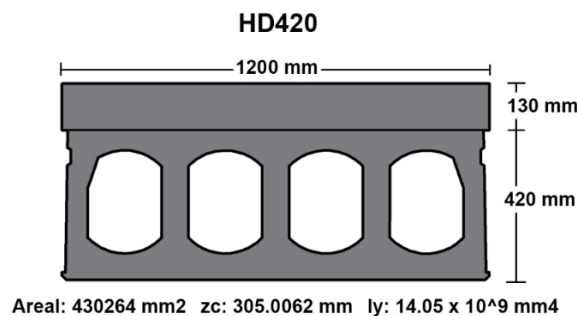
(Betongelementforeningen, 2020)

Betongelementboka skriver videre om påstøp og hvordan dette bidrar til egenvekt og resonansfrekvens:

«Virkningen av en påstøp vil være helt avhengig om den er konstruktiv, dvs. at den gir økt stivhet, eller om den kun er en økt masse. Hvis den er konstruktiv vil resonansfrekvensen øke fordi stivheten øker mer enn massen. Hvis den ikke er konstruktiv vil resonansfrekvensen avta fordi man kun får en økning av massen m .»

(Betongelementforeningen, 2020)

I dette tilfellet er det benyttet en armert konstruktiv påstøp på 0.13m. For å ta høyde for dette er det regnet ut et nytt andre arealmoment for dekket og påstøpet som et felles legeme, for hvert av de 10 HD-tverrsnittene rapporten ser på. Se Vedlegg 3: Tverrsnittstegninger $m/påstøp$.



Figur 37: Skisse av HD400 $m/påstøp$ (Eget arbeid, 2023)

2.5.2.1 Fastsetting av laveste resonansfrekvens

Hulldেকেelementer regnes som enveisplater. Laveste resonansfrekvens for en fritt opplagt enveisplate eller bjelke beregnes av uttrykket:

$$f_l [\text{Hz}] = \left(\frac{\pi}{2 \cdot L^2} \right) \cdot \sqrt{\frac{E_{dyn} \cdot I}{m}}$$

Der enhetene er L [m], I [m⁴], E_{dyn} [N/m²] og m [kg/m]. Massen m inkluderer egenvekten til dekket og vekten til påstøpet, men ikke vekten fra nyttelast. Videre ganges f_l med en korreksjonsfaktor avhengig av innspenning og statikk. For dette tilfellet, fritt opplagt bjelke, er imidlertid denne faktoren lik 1.0, og derfor ikke inkludert i likningen over.

E-modulen brukt ved resonansberegning en dynamisk E-modul, her betegnet E_{dyn} . Den ligger 15 – 20% høyere enn statisk E-modul, E_{cm} , for korttidslast. Antar midt imellom og benytter 17.5% økning:

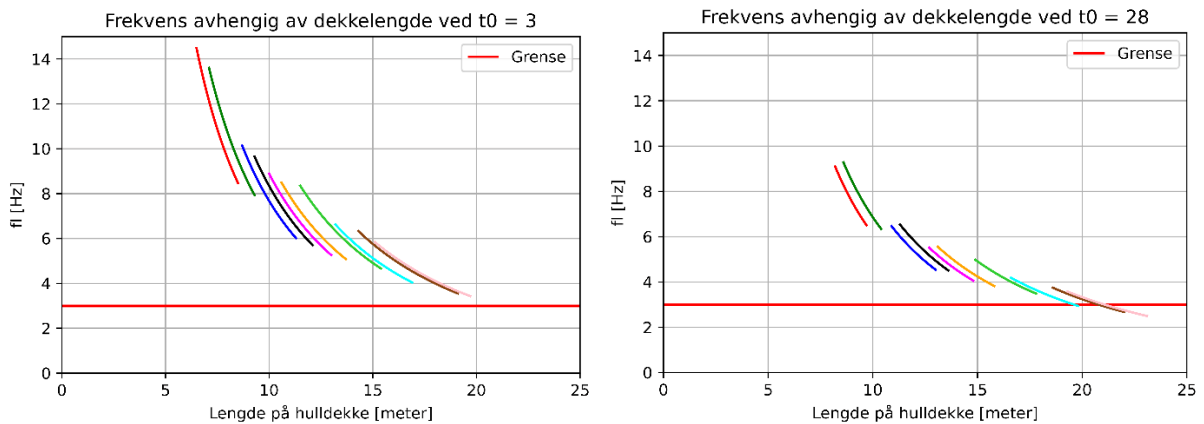
$$E_{dyn} = 1.175 \cdot E_{cm}$$

Dette gir en laveste egenresonansfrekvens, generalisert for hvert tverrsnitt og lengde lik:

$$f_{l_{HDXXX}} = \left(\frac{\pi}{2 \cdot L^2} \right) \cdot \sqrt{\frac{1.175 \cdot E_{cm} \cdot I_{HDXXX,påstøp}}{m}}$$

2.5.2.2 Visualiseringer av laveste resonansfrekvens

Eigenresonansfrekvensen kan nå plottes mot L , for $t_0 = 3$ og $t_0 = 28$ for sammenligninger av betydningen av økninger av t_0 :

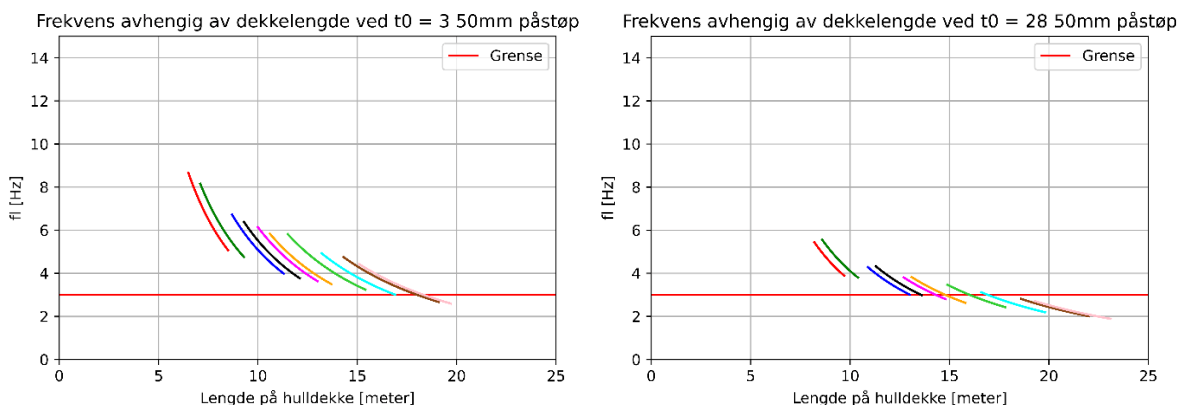


Figur 38: Frekvens avhengig av dekkelengde ved $t_0 = 3$ & $t_0 = 28$

Grafene over viser en tydelig reduksjon av f_l over lengden, pga. økninger av L i likningen over, samt en ytterligere reduksjon ved økninger av t_0 . Dette kommer av valgte definisjonsområde som kutter linjene når et tverrsnitt havner utenfor. En økning av t_0 endrer med andre ord hvilken del av en gitt linje er gjeldende, men endrer ikke selve linjen. Denne «forflytningen» langs linjen, og dermed reduksjonen av f_l , er signifikant ettersom den krysser grenselinjen $f_l = 3.0\text{Hz}$ og setter et maks dekkespenn på $\approx 21.0\text{m}$, uavhengig av toleransegrensene bestemt av nedbøyningen, eller andre kriterier.

Merk at grensen på 3.0Hz gjelder *kun* for kontorbygg, boliger og kjøpesenter. Bygg av andre typer vil ha egne grenser, og må dimensjoneres deretter.

Betydningen av konstruktiv påstøp kan påvises ved å lage de samme grafene, men med en ikke-konstruktiv påstøp med tykkelse 50mm :



Figur 39: Frekvens avhengig av dekkelengde ved $t_0 = 3$ & $t_0 = 28$, 50mm påstøp (Eget arbeid, 2023)

Tykkelsen av påstøpet er endret til 50mm i denne utregningen for å illustrere effekten av konstruktiv mot ikke-konstruktiv påstøp. Dette er en vanlig tykkelse på avrettingsmasse i betongelementbygg.

Økninger av t_0 er ikke gunstig for hulldekker med vanlig 50mm avrettingsmasse, ettersom halvparten av tverrsnittene havner under grenselinjen. Denne dimensjoneringen må i så fall gjøres mhp. f_l , som kan bli avgjørende for svært mange tilfeller.

2.5.2.3 Konklusjon vibrasjon og resonans

Verdien av f_l er avtagende for økende verdier av L , og økende verdier av t_0 . Ved dimensjonering innenfor noen av disse områdene, må f_l tas hensyn til, for å sikre verdier innenfor grensen på 3.0Hz.

For å sikre kontroll mot denne grensen i videre beregninger, tas det med en stiplet grenselinje i grafene videre.

2.5.3 Isolasjon, varme og lyd

Denne rapporten forholder seg til betongdimensjonering og velger derfor å se bort fra lydkrav og varmekrav ettersom disse kravene oppfylles ved andre konstruksjonsdeler enn hulldekkene, slikt som trinnlydsplater i gulv, isolasjon, lydhimlinger og isolerte vegger. Dette anses som utenfor scopet til denne rapporten.

Ser derfor bort i fra alle krav ifb med dette.

2.5.4 Jordskjelv

Opprinnelig ble det utført jordskjelvsberegninger for området, som definert i rapportens antagelser. Dette ble imidlertid etter hvert ansett til å være utenfor rapportens scope, og utenfor sentral problemstilling.

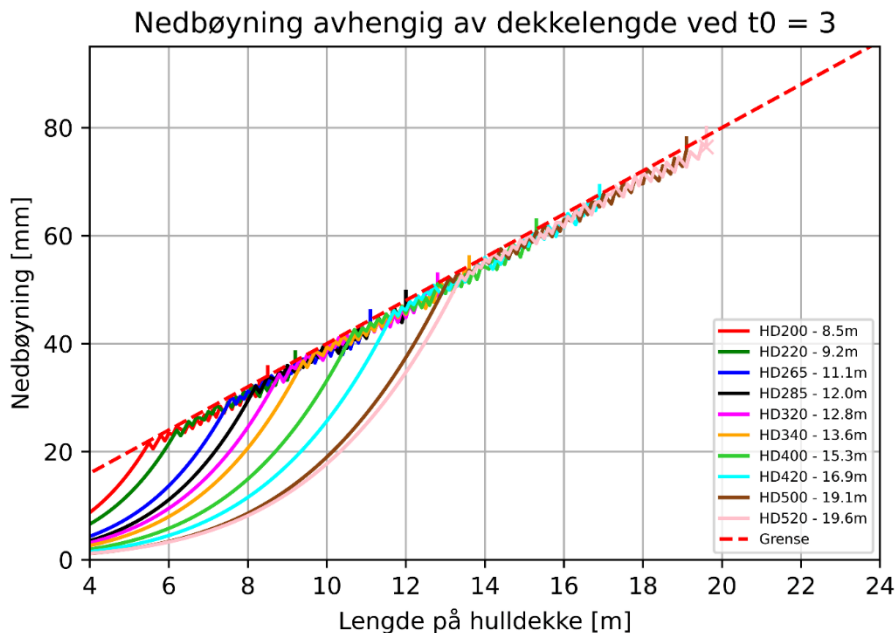
Beregningene ble heller beholdt som et vedlegg, dersom leser ønsker innsyn i dette.

3.1 Optimalisering

For den videre optimaliseringsprosessen forblir definisjonsområdet mellom $0\text{mm} \leq \delta_{tot} \leq L/250$, men beregningen av maks forspenningskraft tverrsnittet tåler er ikke lengre hensiktsmessig for optimalisering ihht. problemstillingen. Dette er pga. maks forspenningskraft medfører større armeringsbehov, og dermed dårligere verdier for CO₂-utslipp.

For å komme rundt dette endres beregningsgangen for å finne P , slik at den nå finnes ved å starte for veldig lave verdier, og øker frem til $\delta_{tot} \approx L/250$ er oppnådd. Altså en P som kun sikrer tilnærmet maks nedbøyning anbefalt for hvert spenn av lengde L .

Plottes nedbøyning mot alle lengder av L for en gitt t_0 , kan kodingen kontrolleres og resultatene visualiseres:



Figur 40: Nedbøyning avhengig av dekkelengde ved $t_0 = 3$ (Eget arbeid, 2023)

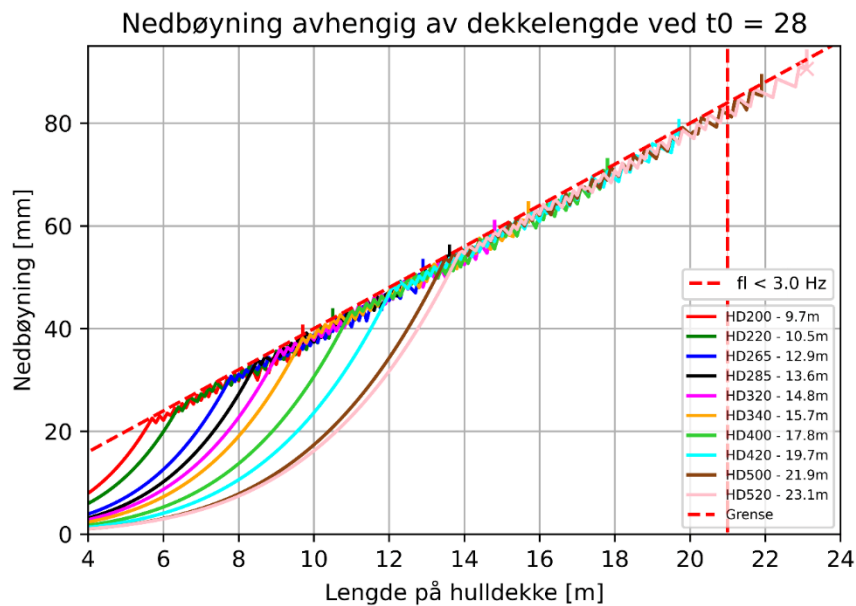
Grafen viser at nedbøyningen starter på 0mm, og øker med lengden. I dette området klarer ikke beregningsgangen å «produsere nok» nedbøyning. Dette er pga. minste armeringsdiameter tilgjengelig. Dette området er en del av definisjonsområdet.

Der linjene når grenselinjen $L/250$ er områdene der tverrsnittene får nedbøyning $\approx L/250$. Forspenningskraft og armeringsmengde justeres fortløpende for å beholde denne verdien.

Der linjene kutter vil si når størst mulige spennvidde for hvert tverrsnitt er oppnådd. Nedbøyning videre utover dette området overskrider $L/250$ og er dermed utenfor definisjonsområdet. Verdiene er vist i tabellen på høyre side, og streker er lagt inn over grenselinjen med riktig farge og plassering for visualiseringens del.

Når t_0 nå øker, vil ikke tverrsnittet trenge like høye verdier for P for å opprettholde $L/250$. I stedet for en reduksjon i nedbøyning over t_0 , vil P reduseres.

Effekten på definisjonsområdene ved endring av t_0 vil bli en «forskyvning» av mulige lengder, tilsvarende som tidligere ved $P = P_{maks}$ etter tverrsnittenes toleransegrenser. Plottes tilsvarende for $t_0 = 28$ kan dette tydeliggjøres:



Figur 41: Nedbøyning avhengig av dekkelengde ved $t_0 = 28$ (Eget arbeid, 2023)

Merk at lengste mulige dekketspenn for HD500 og HD520 er hhv. 21.9m og 23.1m, men disse lengder passerer grenselinjen satt av $f_l < 3.0$ Hz. For disse må evt. spesielle hensyn tas, for å sikre egenfrekvensresonans innenfor kravene beskrevet i 2.5.2 *Vibrasjon og resonans*.

Formålet med å definere nedbøyningen på denne måten er å kunne se valgene av dekkene som blir tilgjengelige med økningene av t_0 , uten at sammenligningene foregår på feil premisser. Altså, sammenligningene skal foregå opp mot forskjellige dekker som alle er dimensjonert som «bra nok» etter gjeldende krav, men som samtidig unngår overdimensjonering.

3.1.1 Spenninger i tverrsnitt

Når forspenningskraften P er definert til å være det minste mulig som sørger for nedbøyning innenfor $\delta_{tot} \approx L/250$, kan risiko for riss forekomme, og forutsetningene lagt til grunn for alle utregningene endres.

For å unngå dette settes en maksimumsgrense for spenningene i nedre fiber av tverrsnittenes midtpunkt lik:

$$\sigma_{c.L}^{n.midt} \leq f_{ctk,0.05} = 0.7 \cdot f_{ctm} = 2.7 \text{ MPa}$$

Dermed er tverrsnittene sikret mot rissdannelse, og beregningene kan fortsette.

Samtidig er det satt en grense for spenningene i øvre fiber av tverrsnittenes midtpunkt:

$$\sigma_{c.L}^{\emptyset.midt} \geq -f_{ck}$$

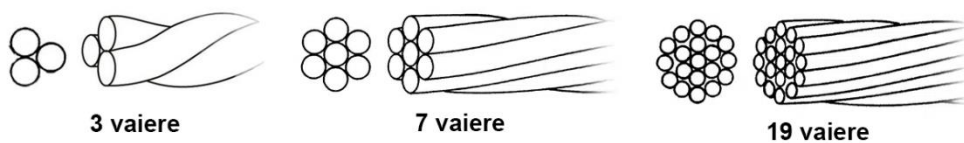
Der f_{ck} er negativt grunnet trykk.

3.1.2 Optimalisering av betong

Optimaliseringen av betongen i hulldekkeelementene skjer ved økninger av t_0 , etter rapportens sentrale problemstilling. Denne økningen gir flere valg og mulige mindre tverrsnittstørrelser. Se *Figur 40* og *Figur 41* over.

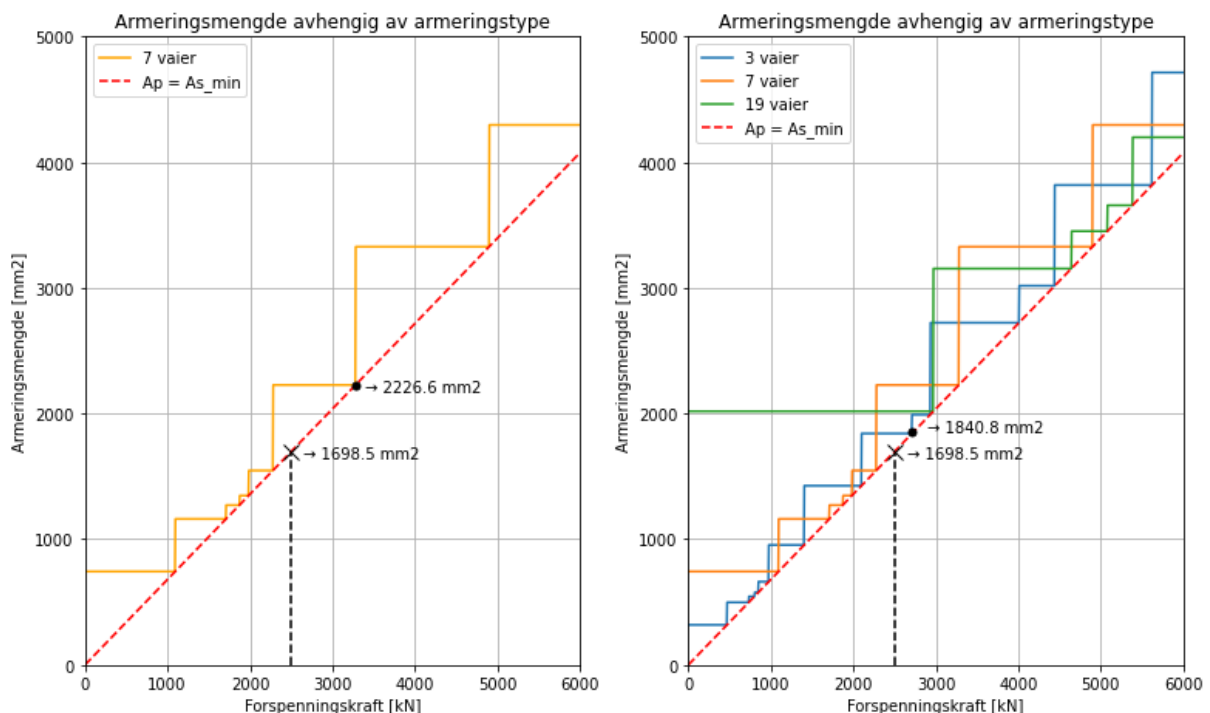
3.1.3 Optimalisering av armeringsmengde

Tidligere ble det konkludert med at bedre tilpasning av armeringsmengden er viktig mtp. miljøhensyn. Sement som inngår i betongproduksjon er kjent som miljøoversting, men stålet brukt i forspenningen vil også ha en effekt. Derfor blir armering bedre tilpasset med å inkludere 3- og 19-vaierkabel, også vanlige dimensjoner hos flere produsenter (ASTM, 2013), for å bedre tilpasse mengden:



Figur 42: Skisse av tverrsnitt på 3, 7 og 19-vaierkabel (Eget arbeid, 2023)

Hvis A_p plottes mot $A_{s,min}$ for alle 3 armeringskabeltyper, kan forskjellen visualiseres. Inkluderer også en for kun 7-vaier for å se hvordan tilnærmingene hittil i rapporten har blitt utført:



Figur 43: Armeringsmengde avhengig av armeringstype (Eget arbeid, 2023)

Ser at, for en $P = 2500\text{kN}$, trengs en $A_{s,min} = 1698.5\text{mm}^2$. For 7-vaier kan dette oppnås med $A_p = 2226.6\text{mm}^2$ men inkluderes alle variantene reduseres tallet ned til $A_p = 1840.8\text{mm}^2$, med

en 3-vaierkabel. Det er lett å se herfra at tilnærmingen blir vesentlig bedre av å inkludere flere typer spennarmeringskabler i dimensjoneringsprosessen.

Økninger av t_0 vil nå, med det nye definisjonsområdet, redusere verdien for P . Dette vil føre til mindre $A_{s,min}$, og mindre A_p . Samtidig er risiko for rissdannelser unngått ved å inkludere krav til spenninger i tverrsnittet:

$$\sigma_{c.L}^{n.midt} \leq f_{ctk,0.05}$$

...og:

$$\sigma_{c.L}^{\emptyset.midt} \geq -f_{ck}$$

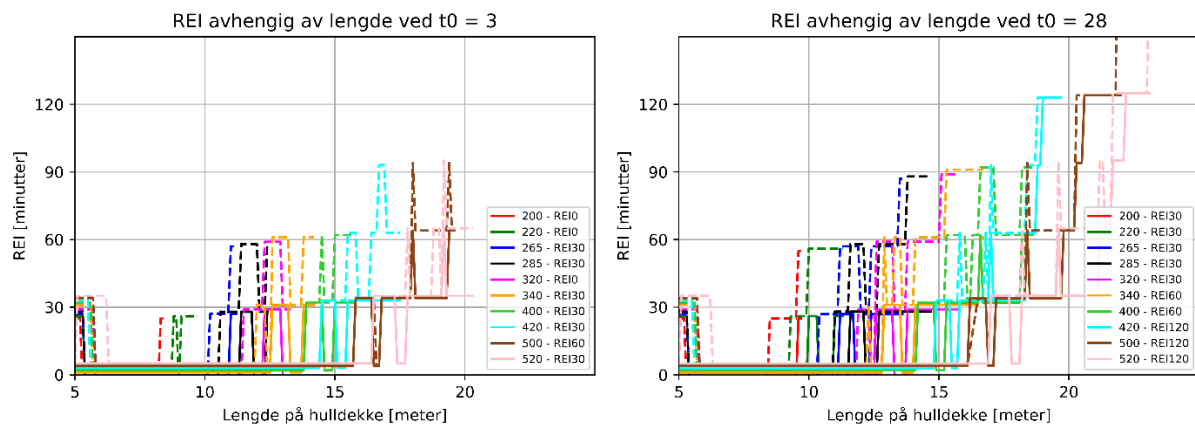
3.1.4 Påvirkninger mot tidligere funn

Relevante tidligere ytterligere krav er mtp. brann og egenfrekvensresonans. Det må undersøkes om endringen av området for P og nedbøyningen påvirker disse. Som en sjekk kjøres den samme plottingen av grafene brukt tidligere, ved behov.

3.1.4.1 Brannkrav

Med en forspenningskraft P som blir bestemt fra å tilnærme $L/250$ så vil armeringsmengden A_p reduseres. Dette vil kreve mindre overdekning, og gi mindre armeringsdybde a . Dette vil medføre en reduksjon av brannmotstandsklassene.

Hvis diagrammet fra 2.5.1.3 *Kontroll av brannkrav mot L* gjentas for $t_0 = 3$ og $t_0 = 28$, vil forskjellene fra endringen av P komme frem:



Figur 44: REI avhengig av lengde ved $t_0 = 3$ (Eget arbeid, 2023)

Alle ujusterte verdier for lengder under 10.0m, med endringen av P , tilfredsstill ikke kravene brannmotstandsklasse. Noen elementer får justert klasse REI 30, og bedre etter økende lengde. Effekten av økende lengde og økende t_0 er fortsatt en bedring av motstandsklassen.

Kaosen i justert brannmotstandsklasse på denne grafen kommer fra små forandringer i armeringsutnyttelsen. For enkelte lengder oppnås kravene, men denne effekten forsvinner ved økende lengde, og kommer tilbake igjen, ved økning av armeringsdiameteren. Dette

gjelds imidlertid over svært spesifikke områder, og må sjekkes individuelt, hvis denne justerte verdien er et krav.

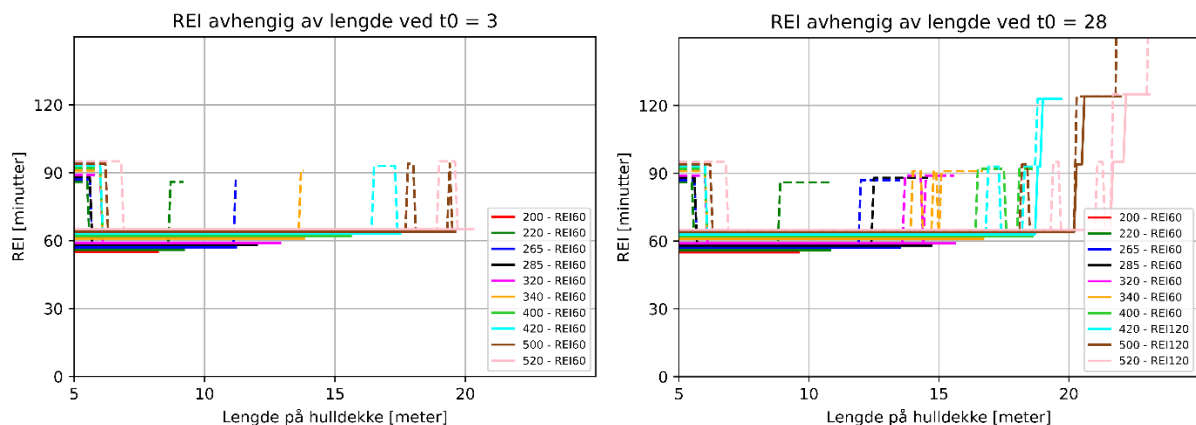
De fleste tverrsnitt her er, over de fleste lengder, for begge verdiene av t_0 , ikke godkjent ihht. rapportens krav. Dette kommer av hvordan rapporten tidligere har definert $c_{min,b}$:

$$c_{min,b} = 1.5 \cdot verdige[0] \cdot d_antall_vaier$$

Når forspenningskraften er satt på til et minimum, for å tilnærme $\delta_{tot} \approx L/250$, blir armeringsdiameterene som følger små. Dette minker $c_{min,b}$, og påvirker oppnådd brannmotstandsklasse direkte.

For å unngå resultater som inkluderer elementer ikke godkjent ihht. brann, blir $c_{min,b}$ endret til minimum 35mm, etter Tabell D 4.1 (*Betongelementforeningen, 2017*), og koden kreve minimum brannmotstandsklasse REI 60, etter tabell 43 (*Sintef Byggforsk, 2017*). Dette vil sikre at alle elementer inkludert i videre analyser oppnår denne minimumsverdien, og dermed er godkjent etter rapportens parametere.

Grafene over plottes igjen, nå med nye definerte verdier $c_{min,b}$, for å kontrollere:



Figur 45: REI avhengig av lengde ved $t_0 = 3$, oppdatert $C_{min,b}$ (Eget arbeid, 2023)

Som ønsket er det nå kun inkludert hulldekker som oppnår minimum REI 60, over hele lengden. Noen av tverrsnittene oppnår også en høyere justert brannmotstandsklasse, men dette er kun for noen få tverrsnitt og lengder. Dette er dermed ansett som optimalisert ihht. brannkrav.

På denne måten er det sikret et resultat rapporten kan fortsette med, etter kravene beskrevet tidligere.

3.1.4.2 Vibrasjon og resonans

Fra likningen for egenresonansfrekvens:

$$f_l [\text{Hz}] = \left(\frac{\pi}{2 \cdot L^2} \right) \cdot \sqrt{\frac{E_{\text{dyn}} \cdot I}{m}}$$

...kan det vises direkte at den har ingen sammenheng med P , A_p , e_p , z_c , eller noen av de andre faktorene som blir påvirket av endringen av hvordan P blir definert.

Dermed kan det konkluderes at spesielle hensyn mot egenresonansfrekvens fortsatt ikke trengs å bli tatt, utover maks dekkespenn $\approx 21.0\text{m}$, funnet i 2.5.2.2 *Visualisering av laveste resonansfrekvens* : Frekvens avhengig av dekkelengde ved $t_0 = 3$ & $t_0 = 28$.

3.2 Miljøpåvirkning

Miljøpåvirkningen av hulldekker er i denne rapporten begrenset mot miljøpåvirkningen av materialene brukt i produksjon. Betong og spennstål. For å kunne se miljøpåvirkningen av optimaliseringen, mot økninger av t_0 , må først noen konstanter defineres.

3.2.1 Sement

Ulike betongelementprodusenter viser til litt forskjellig, men benytter verdi 13.5% sementbruk i produksjonen av hulldekkerelementer (Loe Betong AS, 2018).

Beregningsgangen blir følgende pr. 1.0m lengde, pr. tverrsnitt:

$$\text{sem. mengde}_{HDXXX} [\text{m}^3] = \frac{A_{c,HDXXX}}{10^6} \cdot 1.0\text{m} \cdot 0.135 \frac{\text{m}^3 \text{ sement}}{\text{m}^3 \text{ dekke}}$$

Der A_c er hentet fra AutoCAD for hvert tverrsnitt, oppgitt i mm^2 , og faktoren 0.135, oppgitt over, for 13.5% sement i betongen.

$$\text{sem. vekt}_{HDXXX} [\text{tonn}] = \text{sem. mengde}_{HDXXX} [\text{m}^3] \cdot 1.44 \frac{\text{tonn sement}}{\text{m}^3}$$

$$\text{CO2ekv}_{\text{sement},HDXXX} [\text{tonn}] = \text{sem. vekt}_{HDXXX} [\text{tonn}] \cdot 0.8 \frac{\text{tonn CO2}}{\text{tonn sement}}$$

Der 0.8 tonn CO2/tonn sement gjelder for moderne og utslippsbevisst sementproduksjon (Norsk Betongforening, 2016).

3.2.2 Spennstål

Beregningsgangen for spennstålet blir tilsvarende:

$$A_{p,m^3,HDXXX,L} [\text{m}^3] = \frac{A_{p,HDXXX,L}}{10^6} \cdot 1.0\text{m}$$

Der $A_{p,HDXXX,L}$ oppgitt i $[\text{mm}^2]$ er hentet for hvert aktuelt tverrsnitt med tilhørende lengde L .

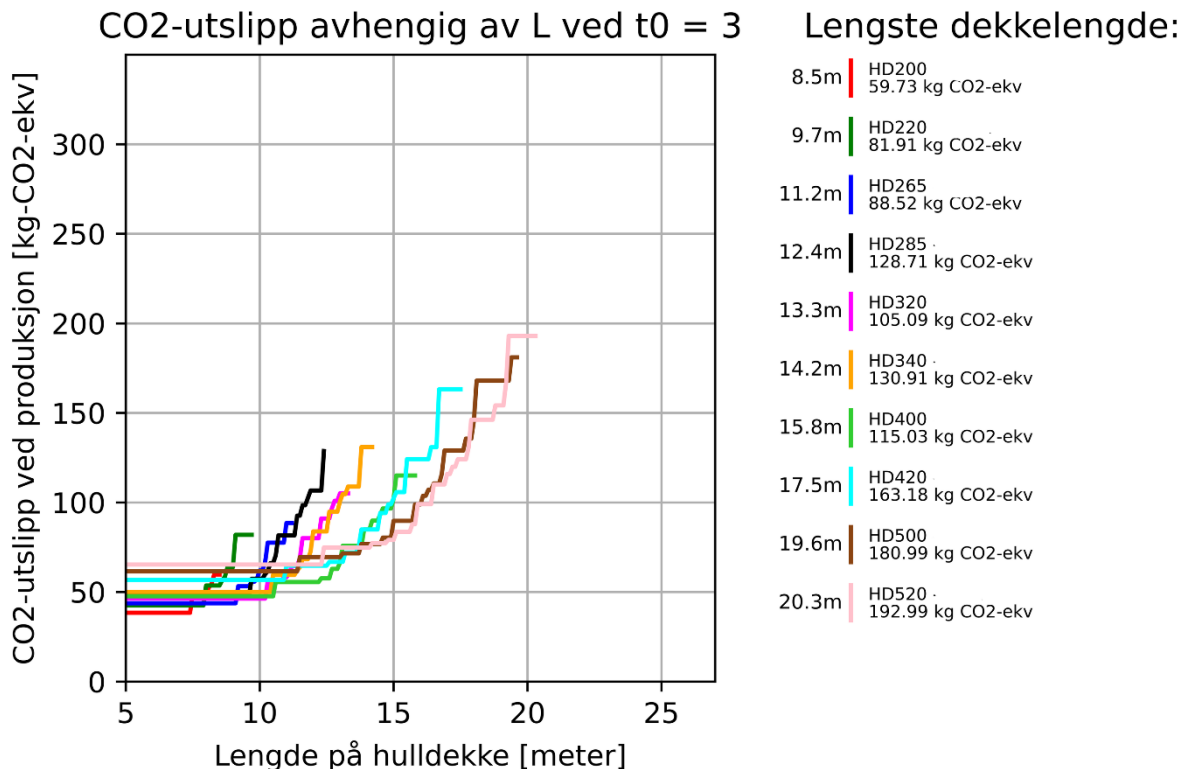
$$A_{p,vekt,HDXXX,L} [\text{tonn}] = A_{p,m^3,HDXXX,L} \cdot 7.85 \frac{\text{tonn stål}}{\text{m}^3}$$

$$\text{CO2ekv}_{A_{p,vekt,HDXXX,L}} [\text{tonn}] = A_{p,vekt,HDXXX,L} [\text{tonn}] \cdot 5.64 \frac{\text{tonn CO2}}{\text{tonn stål}}$$

Der 5.64 tonn CO₂ / tonn spennstål gjelder for spennstål Y1860S7, med resirkuleringsgrad 40% (Yepes, 2014).

3.3 Resultater

Med formlene over, og definisjonene på plass kan CO₂-utslipp som funksjon av L plottes for en gitt t_0 :



Figur 46: CO₂-utslipp avhengig av L ved $t_0 = 3$ (Eget arbeid, 2023)

Merk at verdiene på y-aksen for [kg-CO₂-ekv] gjelder pr. løpemeter, som definert i beregninggangen i 3.2.1 Sement og 3.2.2 Spennstål.

Som forventet øker CO₂-utslippet i med lengden, etter tverrsnitt. Verdiene før $L \approx 7$ m er et område der alle tverrsnitt har minste armeringsmengde mulig etter tidligere definerte kabeltyper og vaierdiametere. Dette området kan dermed anses som et utgangspunkt for utslipp fra produksjonen av en meter av et gitt tverrsnitt.

Alt som foregår videre, etter $L \approx 7$ m, skjer altså utelukkende på grunn av økninger av armeringsmengden.

Merk også at i dette første området så ligger alle tverrsnitt i stigende rekkefølge etter tverrsnittshøyde, unntatt HD340 og HD400. Dette skjer pga. to ting. Tverrsnittsarealene til HD400 og HD340 er relativt like, pga større hull i HD400, som også har et hull mindre. Se Vedlegg 2: Tverrsnittegninger AutoCAD. HD340 bruker altså en kabel mer, armert etter rapportens definerte armeringsplassering. Dette i tillegg til relativt like arealer mellom elementene, og havner derfor dårligere ut her.

Tabellen på høyre side av grafen i *Figur 46* viser referansedata for hvert tverrsnitt ved sitt lengste mulige spenn.

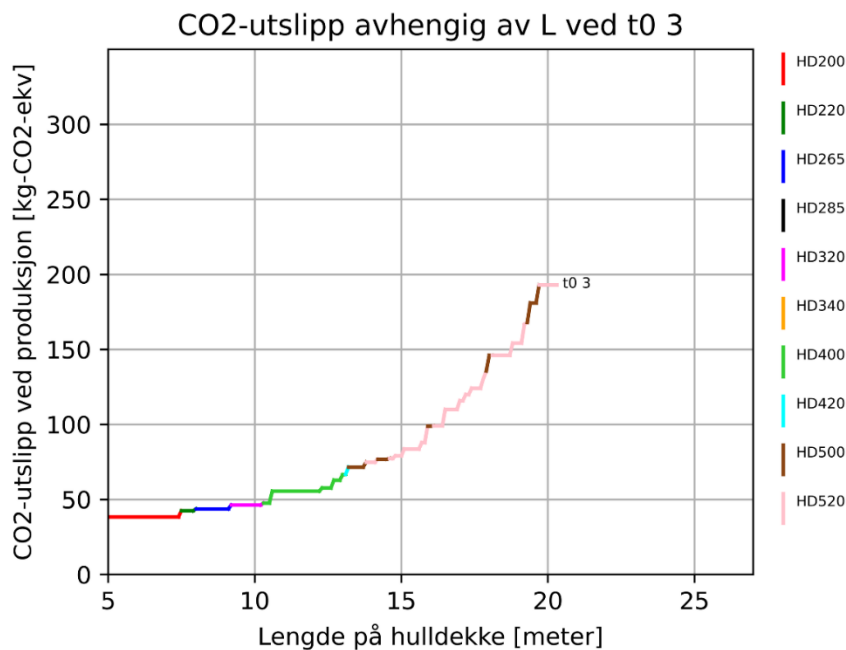
Tabellen under viser kg-CO₂-ekv. for hvert dekke ved sitt lengste spenn, mot optimalisert verdi for denne lengden:

| Tverrsnitt | Lengde [m] | kg-CO ₂ -ekv. | $t_0 = 3$, Optimalisert | kg-CO ₂ -ekv. | Differanse |
|------------|------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|------------|
| HD200 | 8.2 | 77.80 | HD265 | 43.74 | -43.78% |
| HD220 | 9.2 | 81.91 | HD320 | 46.28 | -43.50% |
| HD265 | 11.2 | 98.37 | HD400 | 55.57 | -43.51% |
| HD285 | 12.0 | 106.64 | HD400 | 57.65 | -45.94% |
| HD320 | 12.9 | 105.09 | HD400 | 66.44 | -36.78% |
| HD340 | 13.8 | 130.91 | HD520 | 74.82 | -42.85% |
| HD400 | 15.6 | 115.03 | HD520 | 87.87 | -23.61% |
| HD420 | 17.5 | 163.18 | HD520 | 124.12 | -23.94% |
| HD500 | 19.6 | 180.99 | HD500 | 180.99 | 0% |
| HD520 | 20.3 | 192.99 | HD520 | 192.99 | 0% |
| | | | | Snitt: | -30.39% |

Tabell 10: Hvert hulldekkets lengste spenn og tilhørende kg-CO₂-ekv sammenlignet med et optimalisert hulldekke (Eget arbeid, 2023)

Denne tabellen viser godt forskjellene mellom å dimensjonere etter maks nedbøyning, δ_{maks} , som et tverrsnitt tåler ved følgende maks spennvidde, og dimensjonering etter optimaliserte CO₂ verdier. Snittet for reduksjonen er på hele -30.39% kg-CO₂-ekv. Tabellen viser godt at for CO₂-utslipptoptimalisering, er større tverrsnitt bedre, etter rapportens parametere.

For å forenkle lesingen av *Figur 46* blir den nå plottet slik at det tegnes en linje som følger kun beste verdien for CO₂-utslipp, etter L , med fargene beholdt som tidligere, for enkel tverrsnittsreferanse langs linjen:



Figur 47: CO₂-utslipp avhengig av L ved $t_0 = 3$, optimal

Det interessante her er altså at når både sementmengde og armering er tatt høyde for, blir faktisk ikke det *minste* tverrsnittet nødvendigvis mest miljøvennlige. Miljøpåvirkningen til armeringen fører til at det er tverrsnittet som oppfyller både kravene til nedbøyning og spenning, og samtidig har mindre armeringsmengde, A_p , som blir det mest miljøvennlige valget for en gitt lengde.

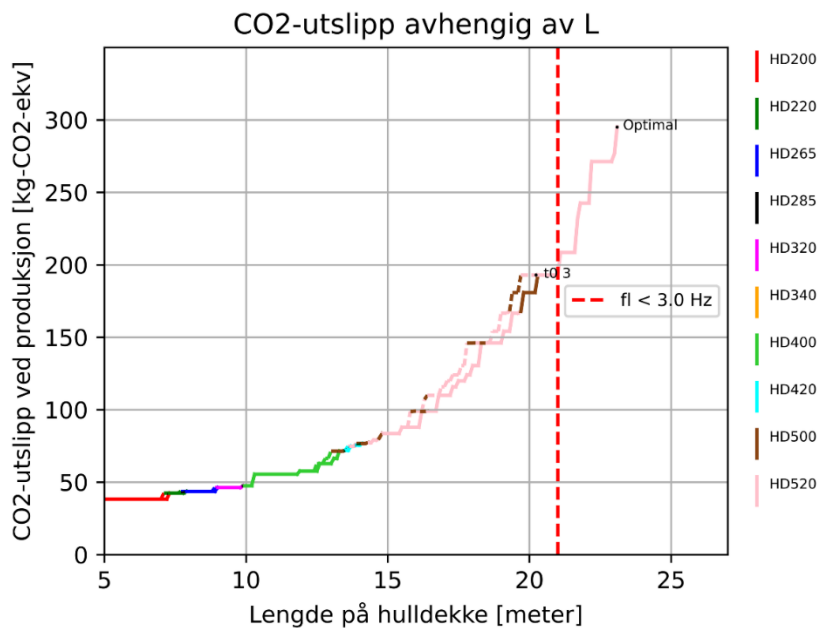
I ettertid gir dette mening. Basert på resultatene gjennom denne rapporten, kreves det større forspenningskraft, P , for å holde et mindre tverrsnitt innenfor $L/250$. Dette medfører større armeringsbehov.

Det er mindre stål i et tverrsnitt enn betong, men ettersom egenvekten, og tonn CO₂-ekv pr. tonn er såpass mye høyere for stål enn for sement, blir stålmengden avgjørende for alle spenn som ikke benytter minimumsarmering. Dette resulterer i en økning av CO₂-ekv fra stål, større enn reduksjonen fra sementmengden.

3.3.1 CO₂-utslipp mhp. t_0

Til slutt gjenstår det å se hvilken effekt økninger av t_0 vil ha for CO₂-ekv, og valg av dekketørrelse. For å gjøre dette er det plottet verdier for CO₂-utslipp for hvert tverrsnitt, for alle t_0 , fra 3 – 28 dager. Dette gir totalt 250 linjer. Deretter er diagrammet tegnet ved at kun linjen langs laveste CO₂-verdi for de 250 linjene blir tatt med, på tilsvarende måte som over for $t_0 = 3$. I tillegg er linjen for kun $t_0 = 3$ tatt med for enkel sammenligning av effekten, stiplet for å kunne skille linjene.

Dette forenkler tolkingen:



Figur 48: CO2-utslipp avhengig av L, $t_0 = 3$ & $t_0 = 28$ (Eget arbeid, 2023)

I denne grafen kommer forskjellene mellom $t_0 = 3$ og en vilkårlig økning av t_0 for den optimale linjen frem. Disse kommer først frem ved lengre spenn. Største forskjellene ligger i området $L = 15.8\text{m} - 20.3\text{m}$, der største forskjellen på CO2-utslipp blir $\approx 10\text{kg-CO}_2\text{-ekv/løpemeter}$. Over dette området gjelder kun optimal linje, ettersom største spennvidden med $t_0 = 3$ er 20.3m .

Settes tilsvarende tabell som over, *Tabell 10*, kan effekten av maks lengde på tverrsnitt mot optimalisert dekke, etter optimalisert t_0 vises:

| Tverrsnitt | Lengde [m] | kg-CO2-ekv. | Optimalisert dekke | Optimalisert t_0 | kg-CO2-ekv. | Differanse |
|------------|------------|-------------|--------------------|--------------------|-------------|------------|
| HD200 | 8.2 | 77.80 | HD265 | 3 | 43.74 | -43.78% |
| HD220 | 9.2 | 81.91 | HD320 | 3 | 46.28 | -43.50% |
| HD265 | 11.2 | 98.37 | HD400 | 3 | 55.57 | -43.51% |
| HD285 | 12.0 | 106.64 | HD400 | 3 | 57.65 | -45.94% |
| HD320 | 12.9 | 105.09 | HD400 | 9 | 62.87 | -40.18% |
| HD340 | 13.8 | 130.91 | HD520 | 3 | 74.83 | -42.84% |
| HD400 | 15.6 | 115.03 | HD520 | 3 | 87.87 | -23.61% |
| HD420 | 17.5 | 163.18 | HD520 | 10 | 119.94 | -26.50% |
| HD500 | 19.6 | 180.99 | HD520 | 21 | 166.68 | -7.91% |
| HD520 | 20.3 | 192.99 | HD520 | 3 | 192.99 | 0% |
| | | | Typetall t_0 | 3 | Snitt: | -31.77% |

Tabell 11: Hvert hulldekkes lengste spenn og tilhørende kg-CO2-ekv sammenlignet med et optimalisert hulldekke for alle mulige verdier for t_0 (Eget arbeid, 2023)

Tilsvarende snitt for optimalisert t_0 mot lengst dekkespenn ved $t_0 = 3$ blir altså -31.77%. En beskjeden økning fra optimalisert $t_0 = 3$ på 1.38pp.

Data for alle tverrsnitt og lengder er også behandlet, for å finne totalt gjennomsnitt, over hele lengden fra 5.0m – 20.3m, for kg-CO₂-ekv reduksjon mellom linjene $t_0 = 3$ og $t_0 =$ optimal. Resultatene er vist i tabellen under:

| Type | Lengde | Totalt utslipp [kg-co2-ekv] | Differanse [kg-CO2-ekv] | Gjennomsnittlig utslipp | Differanse [%] |
|----------------------|--------------|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------|
| $t_0 = 3$, optimal | 5.0 – 20.3 m | 12596.97 | | 81.80 | |
| alle t_0 , optimal | 5.0 – 20.3m | 12074.96 | - 522.01 | 78.41 | -4.14% |
| | | | | t_0 : typetall | 3 |
| | | | | t_0 : snitt | 7.1 |
| | | | | t_0 : median | 3 |

Tabell 12: Gjennomsnittlig CO₂-besparelse for dekker 5.0 - 20.3m (Eget arbeid, 2023)

Over hele tverrsnittet ligger snitt besparelse på -4.14%, med typetallet for $t_0 = 3$ dager. Dette gir mening, ettersom halve spennet har tilnærmet ingen forskjell mellom $t_0 = 3$ og økninger av t_0 .

Dette blir ikke en helt nøyaktig beskrivende for besparelsene, ettersom største effekten kommer etter 15.8m. Settes samme tabell opp for dette spennet, kan de største besparelsene vises:

| Type | Lengde | Totalt utslipp [kg-co2-ekv] | Differanse [kg-CO2-ekv] | Gjennomsnittlig utslipp | Differanse [%] |
|----------------------|---------------|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------|
| $t_0 = 3$, optimal | 15.8 – 20.3 m | 6597.28 | | 143.42 | |
| alle t_0 , optimal | 15.8 – 20.3m | 6125.10 | -472.18 | 133.15 | -7.16% |
| | | | | t_0 : typetall | 12 |
| | | | | t_0 : snitt | 13.1 |
| | | | | t_0 : median | 12 |

Tabell 13: Gjennomsnittlig CO₂-besparelse for dekker 15.8 - 20.3m (Eget arbeid, 2023)

For lengre spenn ligger altså snitt på besparelse litt høyere, på -7.16%, med typetall for $t_0 = 12$ dager.

Snittverdi over hele lengden er altså -4.14%, og opp mot et snitt på -7.16%, på det beste, med typetall på t_0 på hhv. 3 og 12 dager, på hhv. Tabell 12 og Tabell 13. Dette er en vesentlig ekstra besparelse, mot relativt høye økninger av t_0 . Dette medfører at økninger av t_0 mhp. miljøbesparelser ikke nødvendigvis er den beste måten å redusere utslipp på.

En utskrift av noen utvalgte lengder fra Python over området 15.8m – 20.3m viser verdier for et utvalg lengder, med hvilken evt. forbedringer de har, med tilhørende t_0 :

| Lengde | t_0 | Tverrsnitt | kg-CO2-ekv | Differanse |
|-------------|-------|------------|---------------|----------------|
| 15.8 | 3 | HD500 | 98.89 | |
| | 5 | HD520 | 87.87 | - 11.14% |
| 16.5 | 3 | HD520 | 110.09 | |
| | 10 | HD520 | 99.08 | - 10.00% |
| 17.5 | 3 | HD520 | 124.12 | |
| | 10 | HD520 | 119.94 | - 3.37% |
| 18.5 | 3 | HD520 | 146.18 | |
| | 3 | HD520 | 146.18 | - |
| 19.5 | 3 | HD500 | 180.99 | |
| | 12 | HD520 | 166.68 | - 7.91% |
| 20.3 | 3 | HD520 | 192.99 | |
| | 3 | HD520 | 192.99 | - |
| | | | Snitt: | - 8.11% |

Tabell 14: Pythonutskrift over et utvalg lengder med $t_0 = 3$ sammenlignet med optimal t_0 (Eget arbeid, 2023)

Tabell 14 over viser at det ikke nødvendigvis er størst t_0 som er optimal, men heller den t_0 – verdien nødvendig for å gi armeringsreduksjoner, etter gitt lengde, og andre påvirkende faktorer. Dette må dermed sees i sammenheng med hvert prosjekts mål og begrensninger.

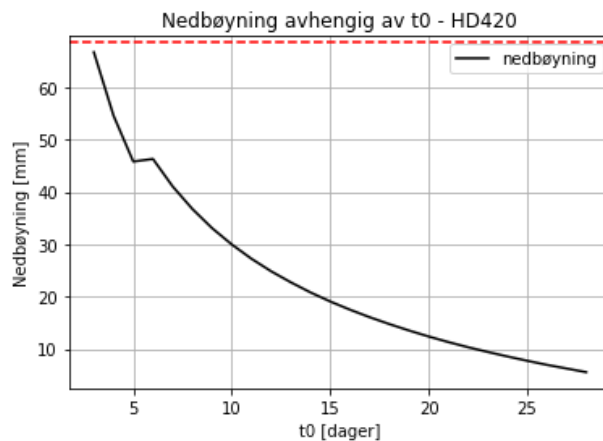
3.3.2 Eksempel

For å plassere tallene i kontekst kan et eksempelbygg undersøkes. Prosjektet som inspirerte denne rapporten, Fornebuporten, har 10 stk utkragerer med overheng på 18.0m, og dekkespenn 17.2m. Disse utkragerne er utført med HD420, samt konstruktivt påstøp på 0.13m som definert tidligere i rapporten.

Til sammen utgjør utkragerne 2580 løpemeter hulldekke.

Tidligere analyser av dette bygget (ikke tatt med i rapporten) viste at dimensjoneringen var sannsynlig gjort mtp. endelig nedbøyning, da dekkene brukt var akkurat innenfor nedbøyningskravene ved $t_0 = 3$ dager.

Grafen under viser resultatet av noen tidlige beregninger:

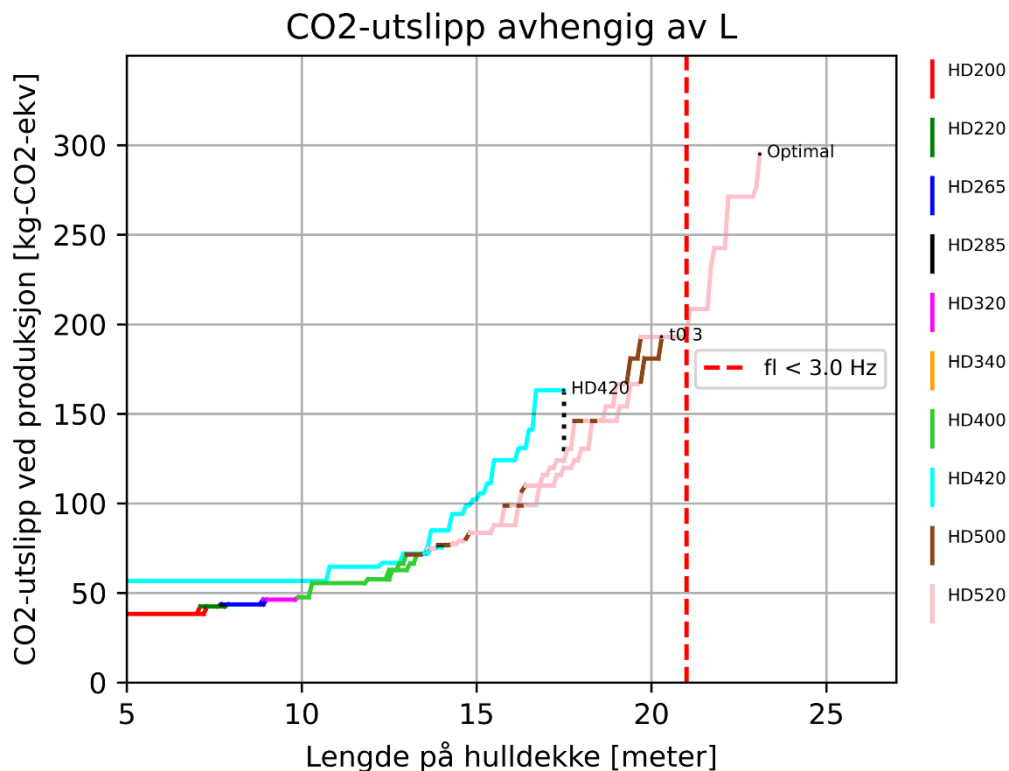


Figur 49: Nedbøyning avhengig av t_0 - HD420 (Eget arbeid, 2023)

Merk at denne grafen ble laget i en tidligere versjon av Python-koden brukt i denne rapporten, som kjører med maks forspenningskraft tverrsnittet tåler, etter styrken oppnådd ved økningene av t_0 . Dette medfører den bråe nedgangen av nedbøyningen over t_0 .

Gitt at beregningsgrunnlaget ved dimensjoneringen av dette bygget også var EC2, vil disse resultatene være sammenlignbare.

Benyttes rapportens grafer til dimensjonering av dette dekkespennet, med rapportens gitte parametere, kan beste dekke for dekkespennet til Fornebuportens utkrager finnes:



Figur 50: CO₂-utslipp avhengig av L, Sammenligning av HD420, $t_0 = 3$ optimal, og alle t_0 optimal (Eget arbeid, 2023)

Grafisk kan det enkelt leses at optimalt tverrsnitt for denne lengden, etter rapportens parametere, er HD520, for både $t_0 = 3$ og optimal t_0 . Utskrift fra Python viser tallverdier for det aktuelle området:

| Type | t_0 | Lengde | Tverrsnitt | Kg-CO2-ekv | Differanse |
|---------------------------|-------|--------|------------|------------|------------|
| HD420 | 3 | 17.2m | HD420 | 163.18 | - |
| Optimal HD | 3 | 17.2m | HD520 | 119.94 | -26.68% |
| Optimal HD, Optimal t_0 | 18 | 17.2m | HD520 | 110.09 | -32.53% |

Tabell 15: Utskrift fra python med verdier for dekkelengder 17.2m (Eget arbeid, 2023)

For $t_0 = 3$ kan altså CO₂-utslipp reduseres med 26.68%. For Rapportens optimaliseringsmetode kan den reduseres med ytterligere 5.85%. Dette tilsvarer 111.56 tonn-CO₂-ekv for optimalt $v/t_0 = 3$, og 136.97 tonn-CO₂-ekv for optimal $v/t_0 = 18$, for prosjektets utkragere.

3.3.3 Konklusjon eksempel

En reduksjon av CO₂-utslipp på inntil -32.53% pr. løpemeter dekke er signifikant, men en økning av herdetiden til $t_0 = 18$ er svært høyt. Dette hadde forlenget byggetiden, og økt prisen på bygget vesentlig.

Forbedring på -26.68% fra HD420 – HD520 med $t_0 = 3$ kan også være utfordrende. Det kunne medført en økning av Fornebuportens høyde med 0.7m, eller redusere hver av de 7 etasjene med 10cm. Dette kan skape utfordringer ift. områdets gjeldende arealplaner og regler ift. maks høyder på bygg, eller evt. utfordringer med tekniske deler av bygget som ventilasjon o.l.

Brannmotstandsklassekravet på Fornebuporten var i tillegg REI 90. Figur 45 viser at tverrsnittet oppnår en *justert* brannmotstandsklasse på REI 90 for $L = 17.2m$. Dette er ansett som godt nok for sammenligning. Hvis prosjektet ble dimensjonert etter *ujustert* klasse REI 90, vil dette kunne påvirke tallene i eksemplet.

Denne rapporten har ikke sett på snølast, vindlast, eller andre laster, som punktlaster fra tyngre utstyr, etc., som kan ytterligere påvirke valg under dimensjoneringen.

Andre kriterier ikke behandlet i denne rapporten, som kraftoverføring, knutepunkter, geometriske toleranser, etc. kan også ha påvirket dimensjoneringsprosessen.

Det er mange hensyn å ta ved dimensjonering av bygg. For Fornebuporten kan mange faktorer ha blitt avgjørende. Dette medfører at tallet over må kun ansees som et estimat, og kan endres, etter hvert som flere kriterier og praktiske hensyn inkluderes i dimensjoneringsprosessen.

3.4 Praktiske utfordringer

Det er flere utfordringer med å få gjennomført en slik optimalisering, avhengig av et prosjekts mål og begrensninger.

En utfordring kommer direkte fra rapportens problemstilling: Økninger av t_0 . Økningene forlenger produksjonstiden. Dette vil påvirke både byggetid og pris negativt, som nevnt i *3.3.3 Konklusjon eksempel*.

I byggebransjen er det ofte byggetiden som er det viktigste for å sikre jobber for en entreprenør, med pris som det nest viktigste. Det er urealistisk å anta at bransjen ville gått for en løsning som både er tregere og dyrere, til tross for potensielle miljøgevinster forbundet med det.

En annen utfordring er i ifb. med dekkevalg. For størst mulig etasjehøyder ønskes minst mulig dekkehøyder. Resultatene viste at større dekker var bedre for alle spenn over 10.0m. Dette påvirker størrelsen på etasjeskillere. Dette kan skape andre utfordringer, også som nevnt i *3.3.3 Konklusjon eksempel*.

3.5 Konklusjon

Effekten av å øke herdetid, t_0 , viser en forbedring av kg-CO₂-ekv for lengder over 15.8m. Denne forbedringen varierer etter lengde, og ligger på 7.16% i snitt, for alle verdier fra 15.8m – 20.3 m. Over hele lengden ligger snittet på forbedringene på 4.14%.

Dette er betydelig optimalisering mtp. miljøhensyn, men praktiske utfordringer med gjennomføringen, og høye verdier for t_0 , kan gjøre dette vanskelig.

Valg av større tverrsnitt, med mindre armering, viste seg å være en god optimalisering. Snitt av beste dekketype mot lengste dekkespenn pr. tverrsnitt mhp. CO₂ ble på 30.39%, for alle 10 tverrsnitt $v/t_0 = 3$ og 31.77% v/t_0 optimal.

Større tverrsnitt kan skape andre utfordringer, men er ikke like problematisk som lengre byggetid og større kostnader.

Dette medfører at rapporten konkluderer med at økninger av t_0 av miljøhensyn, med parameterne gitt, er ikke nødvendigvis en gunstig optimalisering, og bør vurderes ut fra hvert prosjekts størrelse og begrensninger. Økning av tverrsnittshøyden, for å redusere nødvendig armering, med $t_0 = 3$ beholdt, er ansett av rapporten som en god optimalisering mhp. miljø og CO₂-utslipp.

3.6 Videre arbeid

Denne rapporten begrenset seg på svært mange områder. Dette gir gode muligheter til videre arbeid med temaet. Disse kan deles inn i flere miljøfaktorer som kan påvirke endelige verdier for miljøbesparelser, og andre dimensjoneringskriterier, som kan påvirke resultatene i denne rapporten.

3.6.1 Andre miljøfaktorer

Rapporten har forbeholdt seg å se på miljøpåvirkninger i dimensjoneringen. Ytre forhold utenfor dette er ansett som utenfor scopet til rapporten. Likevel vil det nevnes noen her, av hensyn til muligheter for videre arbeid med dette temaet.

3.6.1.1 Transport

Rapporten har ikke tatt hensyn til miljøregnskap forbundet med transport av hulldekkene. Større elementer er tyngre, og det er plass til færre ved transport. Hvor mye påvirkning dette kan ha må sees i sammenheng med hvert enkelt prosjekt ift. avstand fra fabrikk, transportmiddel brukt, o.l.

3.6.1.2 Landbruk

Større verdier av t_0 vil medføre behov for lengre lagring på fabrikk. Dette vil kreve større lagerkapasitet på fabrikkene hvis produksjonsmengden skal kunne opprettholdes. Dette vil kreve større landforbruk av fabrikkene og ha en negativ innvirkning på nærområdene.

3.6.1.3 Vannforbruk

Betong- og sementproduksjon krever store mengder vann. Hvis større tverrsnitt er bedre ift. CO₂-utslipp så vil produksjonen av disse kreve større mengder vann. Dette kan ha negative ringvirkninger.

3.6.1.4 Reduksjon av forspenningskraft

Bruk av mindre forspenningskraft vil, utover mindre armeringsbehov, også kreve mindre energi. Størrelsen på denne effekten vil hovedsakelig ha sammenheng med jekkesystemet til fabrikk.

3.6.1.5 Forskjellig resirkuleringsgrad

Rapporten benyttet verdier for CO₂-ekv for stål med antatt resirkuleringsgrad 40%. Stål beholder kvaliteten ved resirkulering. Rapporten har ikke sett på bidrag fra bruk av stål med større resirkuleringsgrad.

3.6.2 Andre dimensjoneringskriterier

Denne rapporten så bort i fra flere dimensjoneringsfaktorer som kunne påvirket resultat.

3.6.2.1 Skjærkrefter

Denne rapporten så bort i fra skjær og skjærarmering, ettersom forspente hulldekker som regel produseres uten. Skjær er kun dimensjonerende ved kortere spenn/høyere laster. Rapporten så kun på faste lastmengder, hovedsakelig for lengre spenn, men en endring av dette ville føre til nødvendighet av skjærberegninger og -dimensjonering.

3.6.2.2 Snølast og vindlast

Rapporten så kun på innvendige dekker og så bort i fra ekstra laster fra snø og vind, som kunne endret resultatene.

3.6.2.3 Tilsetningsstoffer i betong

Rapporten så ikke på effekten av noen tilsetningsstoffer i betongproduksjonen og begrenset seg til kun dimensjonering ihht. Eurokoden og andre oppslagsverk.

3.6.2.4 Fiberarmering

Rapporten har ikke sett på effekten av fiberarmering, o.l., i tverrsnittene.

3.6.2.5 Konstruktive detaljer

Andre kriterier ikke behandlet i denne rapporten var konstruktive detaljer som kraftoverføring, knutepunkter, geometriske toleranser, etc. Disse kunne hatt en effekt på valg av armeringsmengde.

3.7 Feilkilder

Denne rapporten har brukt flere verktøy for beregninger og kalkulasjoner. Dette medfører potensielle feilkilder. Rapporten anerkjenner følgende:

3.7.1 Programmering i Python

Koden brukt i denne rapporten ble etter hvert ganske omfattende, bestående av 1553 linjer. I løpet av utviklingen av denne ble faste verdier ofte gjort om til variabler for å undersøke effekten av endringer. Siden disse kunne stå på flere plasser, måtte alle endres for å sikre riktige resultater. Rapporten gjorde sitt ytterste for å finne slike, og endre utskrifter og grafer hvis feilen ble for stor.

Under rapportens utvikling ble parametere og variabler endret fortløpende. Derfor ble det også beholdt tidligere versjoner av koden, for å enkelt kunne henvise til disse. Dette skapt andre utfordringer, som å holde oversikt over disse tidligere versjonene. Løsningen ble etter hvert å inkludere alle variantene av parameterendringer i samme kode, for å kunne aktivere eller deaktivere disse etter behov.

3.7.2 AutoCAD og tegning av tverrsnitt

Tegning av tverrsnittene foregikk i AutoCAD. Tverrsnittene som ble tegnet, var hentet fra to forskjellige leverandører. Dette for å få tegnet alle de 10 vanligste tverrsnitt, etter de i Betongelementboka. Forskjellige leverandører leverer forskjellige tverrsnitt. De mest like ble valgt for å unngå for store forskjeller, men tverrsnittene bør kontrolleres hvis informasjonen i denne rapporten skal brukes til å estimere verdier for andre tverrsnitt, for å sikre ingen store avvik i design, slikt som antall hull og størrelsen på disse, armeringsplassering, etc.

Kvaliteten på tverrsnittegningene brukt for «tracing» i AutoCAD kunne også vært med å påvirke kvaliteten på verdiene hentet derfra. Dette ble imidlertid ansett som akseptabelt ihht. denne rapporten, ettersom feilene blir svært små, spesielt sammenlignet med håndberegningstilnærminger. Dette var dessverre eneste andre alternativ, da kontakt med hulldekkeleverandører tok langt tid, og ikke gav nok informasjon.

3.7.3 Menneskelige feil

En siste feilkilde denne rapporten anerkjenner er ganske enkelt å glemme en viktig faktor eller trinn i dimensjoneringsprosessen. Dette kan f.eks. være å glemme å ta hensyn til en spesiell grensebetingelse, som kan i verste fall medføre uriktige resultater.

I betongkonstruksjonsanalyse er det mye informasjon å holde styr på. Det er viktig med jevn gjennomgang, og kontroller fra andre fagkyndige, for å begrense slike feil som kan påvirke det endelige resultatet.

3.7.4 Feilaktig informasjon

Rapporten har, ved flere plasser, brukt informasjon funnet på internett. Alle kildehenvisninger er inkludert, men kvaliteten på informasjonen funnet påvirker kvaliteten på resultatene. Feil informasjon i f.eks. kg-CO₂-ekv pr. kg sement vil direkte gi feil resultat i rapporten.

4.1 Referanser

- ASTM. (2013, Februar 28). *New ASTM Steel Standard Covers Test for Prestressing Steel Wire Strands*. Retrieved from ASTM: <https://newsroom.astm.org/new-astm-steel-standard-covers-test-prestressing-steel-wire-strands>
- Betongelementforening. (2017). *Betongelementboka på nett*. Retrieved from Bind D - Brannmotstand, Bestandighet og tetting: https://betongelementboka.betong.no/betongapp/BookD.asp?isSearch=0&liID=31&DocumentId=BindD/Del_1/D3/3_1.pdf&BookId=D
- Betongelementforeningen. (2007). *D 3.3*. Betongelementforeningen.
- Betongelementforeningen. (2010). *Betongelementboken A 4.2.1*. Betong Norge.
- Betongelementforeningen. (2010). *Betongelementboken A 4.2.1 Tabell A 4.2*. Retrieved from Betongelementboken: https://betongelementboka.betong.no/betongapp/BookA.asp?isSearch=0&liID=421&DocumentId=BindA/Del_1/A4/4_2_1_Hulldekker.pdf&BookId=A
- Betongelementforeningen. (2010, Mai). *BIND A - BYGGING MED BETONGELEMENTER*. Retrieved from Betongelementboken: <https://betongelementboka.betong.no/betongapp/BookA.asp?isSearch=0&liID=Forord&DocumentId=BindA/Forord.pdf&BookId=A>
- Betongelementforeningen. (2017). *BIND D - BRANNMOTSTAND, BESTANDIGHET OG TETTING*. Retrieved from Betongelementboken: https://betongelementboka.betong.no/betongapp/BookD.asp?isSearch=0&liID=34&DocumentId=BindD/Del_1/D3/3_4.pdf&BookId=D
- Betongelementforeningen. (2018). *D1 Generelt*. Retrieved from Bind D - Brannmotstand, bestandighet og tetting: https://betongelementboka.betong.no/betongapp/BookD.asp?isSearch=0&liID=11&DocumentId=BindD/Del_1/D1/1_1.pdf&BookId=D
- Betongelementforeningen. (2020). *Betongelementboka C-1.4.1*. Betongelementforeningen.
- Betongelementforeningen. (2020). *Betongelementboka C-1.4.3*. Betongelementforeningen.
- Betongelementforeningen. (n.d.). *Betongelementboka C.1 - 3.4*. Betongelementforeningen.
- Byggforsk. (2020). *520.321 Brannmotstand for etasjeskillere av tre og betong*. Retrieved from https://www.byggforsk.no/dokument/1538/brannmotstand_for_etasjeskillere
- Cantero, D. (2022). Retrieved from Forelesning L9: <https://learn-eu-central-1-prod-fleet01-xythos.content.blackboardcdn.com/5def77a38a2f7/18898026?X-Blackboard-S3-Bucket=learn-eu-central-1-prod-fleet01-xythos&X-Blackboard-Expiration=1681743600000&X-Blackboard-Signature=z0Jeqlg78DdYI%2BiS2hY3hYKTKtO2HEZtT>
- Cantero, D. (2022). Retrieved from Forelesning L18: <https://learn-eu-central-1-prod-fleet01-xythos.content.blackboardcdn.com/5def77a38a2f7/21021999?X-Blackboard-S3-Bucket=learn-eu-central-1-prod-fleet01-xythos&X-Blackboard-Expiration=1683039600000&X-Blackboard-Signature=81AnkkQ%2FZkMCp3D2ohzhsc%2FcqqvtHEvO>
- Cantero, D. (2022). BYGT2320 Betongkonstruksjoner 2 Formelark. *Formelark*. NTNU v/Daniel Cantero.

- Cantero, D. (2022). *Forelesning L3*. Retrieved from Lecture 3 Prestressing methods and materials: <https://learn-eu-central-1-prod-fleet01-xythos.content.blackboardcdn.com/5def77a38a2f7/17931773?X-Blackboard-S3-Bucket=learn-eu-central-1-prod-fleet01-xythos&X-Blackboard-Expiration=1681236000000&X-Blackboard-Signature=DJXV9RghUdwcW0rMgOr329YebPPe0Tr%2BfN>
- CEN. (2004). *Eurokode 2 - Prosjektering av betongkonstruksjoner - Tabell 2.1N – Materialfaktorer for bruddgrensetilstander*. Standard Norge.
- CEN. (2004). *Eurokode 2 Figur 3.1 - Metode for å bestemme kryptallet $\varphi(\infty, t_0)$ for betong under normale miljøforhold*. Sintef.
- CEN. (2004). *Eurokode 2 Prosjektering av betongkonstruksjoner - 3.1.3 E modul over tid (3.5)*. Standard Norge.
- CEN. (2004). *Eurokode 2 Prosjektering av betongkonstruksjoner - 3.3.2 Egenskaper*. Standard Norge.
- CEN. (2004). *Eurokode 2 Prosjektering av betongkonstruksjoner - 5.10.2.2 Begrensning av betongspenninger*. Standard Norge.
- CEN. (2004). *Eurokode 2 Prosjektering av betongkonstruksjoner - NS-EN 1992-1-1:2004+A1+NA Tabell NA.4.1 (902)*. Standard Norge.
- CEN. (2004). *Eurokode 2 Prosjektering av betongkonstruksjoner - Tabell NA.4.2 — Krav til minste overdekning $c_{min,b}$ av hensyn til heft*. Standard Norge.
- CEN. (2004). *Eurokode 2 Prosjektering av betongkonstruksjoner - Tillegg B.1*. Standard Norge.
- CEN. (2004). *Eurokode 2 Prosjektering av betongkonstruksjoner - Tillegg B.2 Grunnleggende ligninger for å fastsette svinntøyning ved uttørking*. Standard Norge.
- CEN. (2004). *Eurokode 2 Prosjektering av betongkonstruksjoner 5.10.6. (1)*. Standard Norge.
- CEN. (2004). *Eurokode 2: 3.1.4 Kryp og svinn - Tabell 3.3*. Standard Norge.
- CEN. (2008). *Tabell NA.A1.1*. Standard Norge.
- CEN. (2009). *EN 10138*. Standard Norge.
- CEN. (2020). *Eurokode 2 - Tabell 2.1N - Materialfaktorer for bruddgrensetilstander*. Standard Norge.
- CEN. (2021). *Eurokode 8 Prosjektering av konstruksjoner for seismisk påvirkning del 1 Allmenne regler, seismiske laster og regler for bygninger*. Standard Norge.
- Epd-Norge. (2018, September 27). *NEPD-1637-656-NO Betongbjelke slakkarmert - B45 M45*. Retrieved from Epd-Norge: https://www.epd-norge.no/getfile.php/139393-1538060786/EPDer/Byggevarer/Betongvarer/NEPD-1637-656_Betongbjelke-slakkarmert-B45-M45.pdf
- Epd-Norge. (2018, September 27). *NEPD-1638-656-NO Hulldekke B45 M45*. Retrieved from Epd-Norge: https://www.epd-norge.no/getfile.php/139397-1538061158/EPDer/Byggevarer/Betongvarer/NEPD-1638-656_Hulldekke-B45-M45.pdf
- Epd-Norge. (2018, September 27). *NEPD-1639-656-No Betongsøyle slakkarmert•• B45 M45*. Retrieved from Epd-Norge: <https://www.epd-norge.no/getfile.php/139401->

- 1538061343/EPDer/Byggevarer/Betongvarer/NEPD-1639-656_Betongs--yle-slakkarmert-B45-M45.pdf
- Epd-Norge. (2018, September 27). *NEPD-1640-656-NO Vegg, tykkelse 200 mm*. Retrieved from Epd-Norge: https://www.epd-norge.no/getfile.php/139405-1538061478/EPDer/Byggevarer/Betongvarer/NEPD-1640-656_Betongvegg-t-200mm-B45-M45.pdf
- Eugene Obrien, A. D. (2012). Detailed member design - Draw in losses. In A. D. Eugene Obrien, *Reinforced and Prestressed Concrete Design to EC2* (p. p383). Spon Press.
- Eugene Obrien, A. D. (2012). Detailed member design - Friction losses. In *Reinforced and Prestressed Concrete Design to EC2 - Second Edition* (p. p376). Spon Press.
- Loe Betong AS. (2018, September). *EPD Hulldekke B45 M45*. Retrieved from epd-norge.no: https://www.epd-norge.no/getfile.php/139397-1538061158/EPDer/Byggevarer/Betongvarer/NEPD-1638-656_Hulldekke-B45-M45.pdf
- Mazella Companies. (n.d.). *1 x 7 and 1 x 19 Galvanized Guy Strand*. Retrieved from Mazella: <https://www.mazellacompanies.com/solutions/product/1-x-7-and-1-x-19-galvanized-guy-strand/>
- Norsk Betongforening. (2016, August). *Betong.net*. Retrieved from Visste du dette om betong og miljø?: <https://betong.net/wp-content/uploads/17966-Visste-du-dette-om-betong-og-milj%C3%B8-WEB.pdf>
- Sintef. (2015, November). *Byggforsk 522.513 Lydisolerende, tunge etasjeskillere*. Retrieved from Byggforskserien: https://www.byggforsk.no/dokument/340/lydisolerende_tunge_etasjeskillere#tab51
- Sintef. (2019, September). *Byggforsk 421.051 Statikkformler for bjelker*. Retrieved from Byggforskserien: https://www.byggforsk.no/dokument/183/statikkformler_for_bjelker#i2
- Sintef Byggforsk. (2017, September). *byggforsk.no*. Retrieved from 321.022 - Oversikt over krav og løsninger ved brannteknisk prosjektering av bygninger: https://www.byggforsk.no/dokument/3307/oversikt_over_krav_og_loesninger_ved_brannteknisk_prosjektering_av_bygninger
- Standard Norge. (2015, Juni 1). *NS-EN 1993-1-1:2005+A1:2014+NA:2015*. Retrieved from Standard Norge: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=755701>
- Standard Norge. (2017, Desember 1). *NS-EN ISO 7243:2017*. Retrieved from Standard Norge: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=954068>
- Standrad Norge. (2008, November 1). *NS-EN 1992-1-1:2004+NA:2008*. Retrieved from Norsk Standard: <https://www.standard.no/no/nettbutikk/produktkatalogen/produktpresentasjon/?ProductID=353701>
- Statens Vegvesen. (2017, mai). *vegvesen.brage.unit.no*. Retrieved from Jordskjelvdessign i Statens vegvesen: <https://vegvesen.brage.unit.no/vegvesen->

xmlui/bitstream/handle/11250/2673011/SVV%20rapport%20604%20Jordskjelvdesign%20i%20Statens%20vegvesen.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Statista. (2023, April). *statista.com*. Retrieved from Global Cement Production In Volume:
<https://www.statista.com/statistics/1087115/global-cement-production-volume/>

Sørensen, S. I. (2013). 5.2.1 Låsetap. In S. I. Sørensen, *Betongkonstruksjoner - Beregning og dimensjonering etter Eurokode 2 - 2.utgave* (pp. 238 - 239). Fagbokforlaget.

Sørensen, S. I. (2013). 5.2.2 Friksjonstap. In S. I. Sørensen, *Betongkonstruksjoner - Beregning og dimensjonering etter Eurokode 2 - 2. utgave* (pp. 241 - 243). Fagbokforlaget.

Thomasarmstrongacpconcrete. (n.d.). *Prestressed Precast Concrete Hollowcore Floors*. Retrieved from Thomasarmstrongacpconcrete:
<https://www.thomasarmstrongacpconcrete.co.uk/hollowcore-prestressed-precast-floors.html>

Yepes, V. (2014, Mars). *iranarze.ir*. Retrieved from Cost and CO2 emission optimization of precast–prestressed concrete U-beam road bridges by a hybrid glowworm swarm algorithm:
<https://iranarze.ir/wp-content/uploads/2020/04/10593-English-IranArze.pdf>

4.2 Vedlegg

| | |
|--|----|
| Vedlegg 1 – Artikkel..... | 1 |
| Vedlegg 2 – Tverrsnittstegninger AutoCad..... | 3 |
| Vedlegg 3 – Tverrsnittstegninger m/påstøp AutoCad..... | 4 |
| Vedlegg 4 – Python kode..... | 5 |
| Vedlegg 5 – Resultater/Datasett fra Python..... | 18 |
| Vedlegg 6 – HD5069 – 1 – HD420 Loe Betong As..... | 28 |
| Vedlegg 7 – Dimensjonering mot jordskjelv..... | 29 |

Vedlegg 1 - Artikkel

Hvordan kan betongindustrien bli mer miljøvennlig?

Byggebransjen, og spesielt betongproduksjon, har lenge blitt ansett som en miljøverstering. Betong er verdens mest brukte byggemateriale, og står for hele 8.0% av verdens totale CO₂-utslipp. Forbedringer på dette området er, med andre ord, svært viktig for en verden som ønsker å redusere sine totalutslipp.

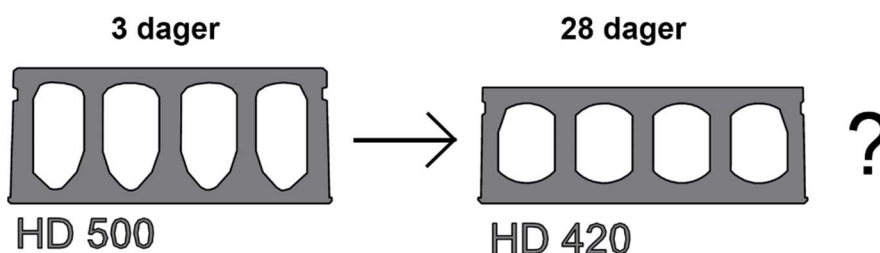
(Jackbilt, 2020)



Et tiltak som har redusert utslipp er hulldekkeelement. Disse består av nærmere 50% luft, og er svært mye brukt som etasjeskillere i alle typer betongbygg fra lagerhaller til skyskrapere. I tillegg bruker disse mindre armering enn tradisjonelt støpte konstruksjoner, dette siden armeringen strammes opp for å motvirke krefter elementene vil bli utsatt for.

Betong må, som kjent, støpes. Dette gjelder like mye for fabrikkproduserte elementer som noe annet. Det tar 28 dager med herding før betongen oppnår sin fulle styrke, men industristandarden for elementer er bare 3 dager.

Spørsmålet som dukker opp, blir da: Hvilke potensielle miljøgevinster kunne blitt oppnådd med å la betongen herde lengre? Hvis betongen er sterkere, kanskje det går an å bruke mindre av den?



Akkurat dette spørsmålet er blitt undersøkt, og svaret er: Det er ikke så enkelt.

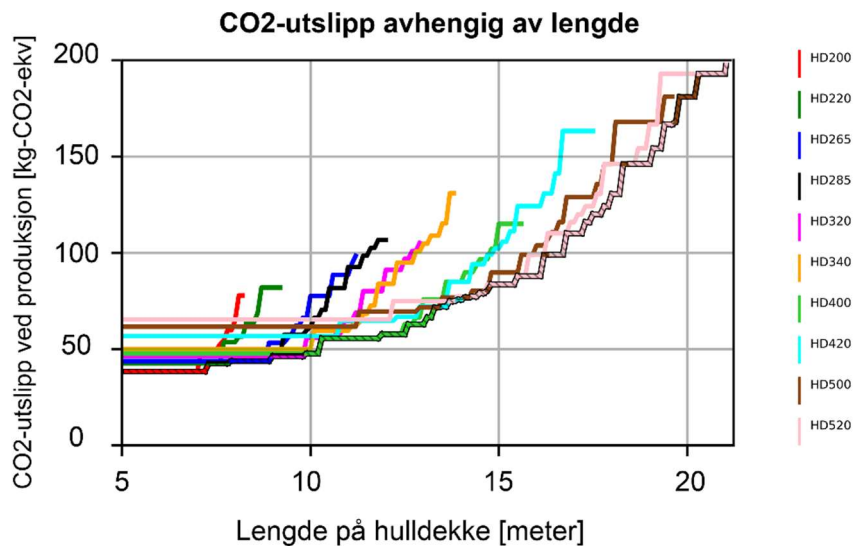
Forsøksberegninger har vist at, ved å øke herdetiden, så kan mindre tverrsnitt brukes, og fortsatt oppfylle alle krav, mot større CO₂-utslipp pr. løpemeter.

Hvorfor er ikke dette bedre?

Mindre tverrsnitt, uavhengig av herdetiden, vil kreve mer armering til å kunne motvirke kreftene de blir utsatt for. Denne økte armeringsmengden spiser opp all fortjeneste, og faktisk enda mer, enn hva man tjener på å redusere betongmengden.

Så mindre tverrsnitt er ofte verre.

Beregningene gjort viser at faktisk, *større* tverrsnitt er ofte bedre av miljøhensyn. Altså å bruke mer betong. Dette er utelukkende på grunn av armeringen. Forspent betong har en relativ liten mengde armering ift. plasstøpte



konstruksjoner, men den blir fortsatt avgjørende ved miljøregnskap.

Lengre herdetid var bedre, men kun ved lengre spenn, og for samme tverrsnitts størrelser. Altså lengre herdetid er kun bedre hvis det gir mulighet for å benytte mindre armering. Over lengdespennet hulldekker brukes på, opp til ca. 21.0m, blir denne effekten beregnet til å utgjøre en reduksjon av CO2-utslipp på ca. 4.0%.

Til sammenligning utgjør forskjellen fra et maks utnyttet tverrsnitt, herdetid 3 dager, til et større tverrsnitt på samme lengde en snittreduksjon på CO2-utslipp på over 30%.

Så, paradoksalt nok, for å redusere CO2-utslipp fra etteroppente hulldekker, er det lurt å bruke *mer* betong, men kun hvis det betyr en reduksjon av armeringsmengden.

Vedlegg 2 - Tverrsnittstegninger AutoCad



HD 200

Area: 119959.4397
zc: 98.3974
iy: 601647668.0000



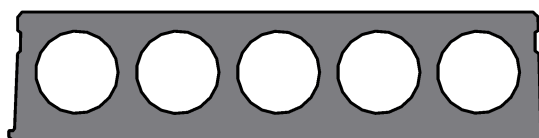
HD 220

Area: 146379.2960
zc: 102.9530
iy: 876653836.0000



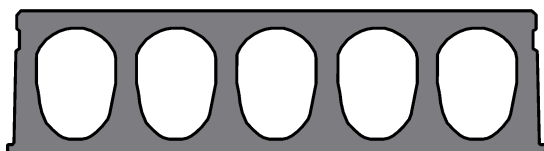
HD 265

Area: 172397.9131
zc: 132.5216
iy: 1530898392.0000



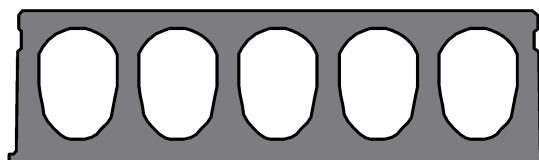
HD 285

Area: 198735.2650
zc: 135.5603
iy: 1979404648.0000



HD 320

Area: 188740.8729
zc: 157.2759
iy: 2447627952.0000



HD 340

Area: 212923.0742
zc: 159.5386
iy: 3050536078.0000



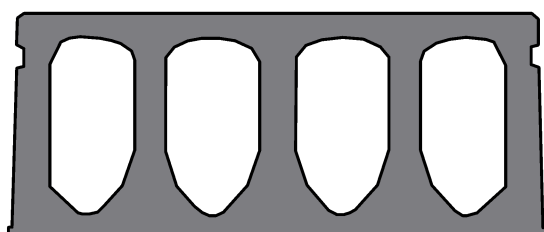
HD 400

Area: 215624.6757
zc: 196.4986
iy: 4401232009.5786



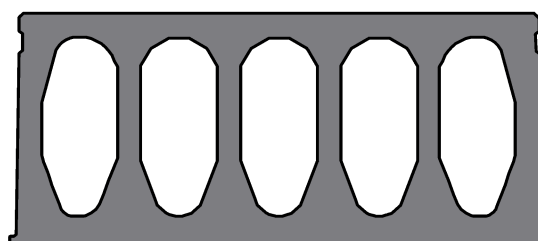
HD 420

Area: 274364.3155
zc: 202.7871
iy: 5918584708.0000



HD 500

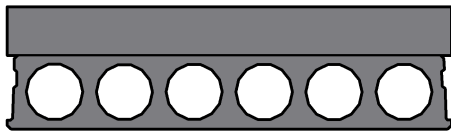
Area: 305202.6371
zc: 236.7968
iy: 9078620985.1807



HD 520

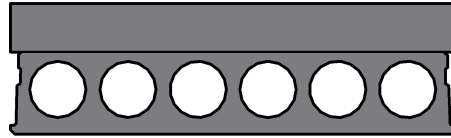
Area: 311094.0677
zc: 244.5994
iy: 10289701408.0000

Vedlegg 3 - Tverrsnittstegninger m/påstøp AutoCad



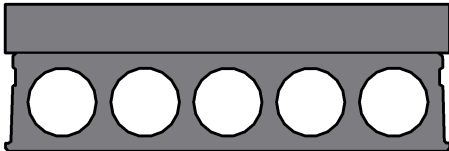
HD 200 m/påstøp

Area: 275959.4397
zc: 191.9868
iy: 2680439606.0000



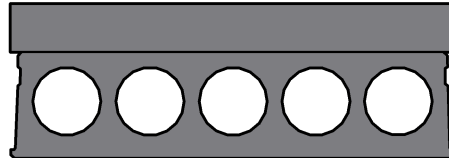
HD 220 m/påstøp

Area: 302379.2960
zc: 197.7221
iy: 3644589882.0000



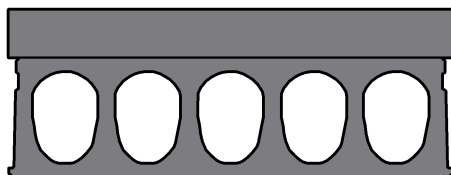
HD 265 m/påstøp

Area: 328397.9131
zc: 226.8031
iy: 4976569252.0000



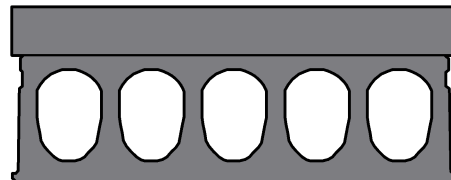
HD 285 m/påstøp

Area: 354735.2650
zc: 230.6807
iy: 6287956702.0000



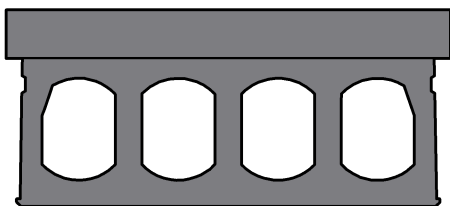
HD 320 m/påstøp

Area: 344740.8729
zc: 260.7450
iy: 7132684312.0000



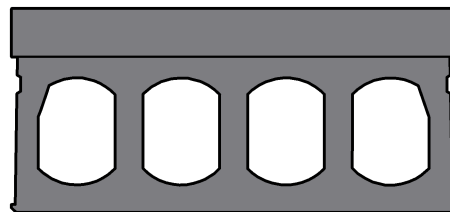
HD 340 m/påstøp

Area: 368923.0742
zc: 263.8932
iy: 8753722096.0000



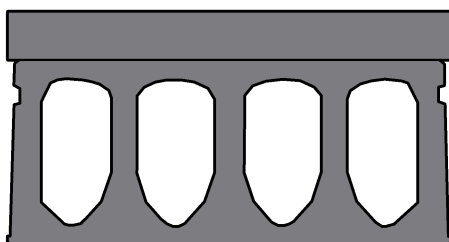
HD 400 m/påstøp

Area: 404866.4764
zc: 297.8112
iy: 12166405021.0000



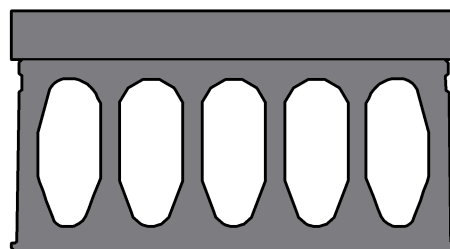
HD 420 m/påstøp

Area: 430264.3155
zc: 305.0062
iy: 14046948900.0000



HD 500 m/påstøp

Area: 461202.6371
zc: 347.3188
iy: 20272618449.3601



HD 520 m/påstøp

Area: 467094.0677
zc: 357.8755
iy: 22461619872.0000

Vedlegg 4 - Python kode

```
1 import numpy as np
2 from matplotlib import pyplot as plt
3 import time
4 from matplotlib import gridspec
5 from numpy import arange
6 from scipy.optimize import curve_fit
7 start_time = time.time()
8
9 def besteDekke(t0):
10
11     plotteGrenser = [{ "mm": [], "m": [], "tap": [], "P0": [], "friktp": [], "svinntap": [], "armering": [],
12                       "Ap": [], "kryp": [], "relak": [], "låsetap": [], "ovre": [], "nedre": [], "grense_overforing": [],
13                       "REI": [], "REI_": [], "t0_": [], "m_": [], "vibrasjon": [], "co2": [], "mmlang": [], "mlang": [],
14                       "valere": [], "armering": []},
15
16                       { "mm": [], "m": [], "tap": [], "P0": [], "friktp": [], "svinntap": [], "armering": [],
17                       "Ap": [], "kryp": [], "relak": [], "låsetap": [], "ovre": [], "nedre": [], "grense_overforing": [],
18                       "REI": [], "REI_": [], "t0_": [], "m_": [], "vibrasjon": [], "co2": [], "mmlang": [], "mlang": [],
19                       "valere": [], "armering": []},
20
21                       { "mm": [], "m": [], "tap": [], "P0": [], "friktp": [], "svinntap": [], "armering": [],
22                       "Ap": [], "kryp": [], "relak": [], "låsetap": [], "ovre": [], "nedre": [], "grense_overforing": [],
23                       "REI": [], "REI_": [], "t0_": [], "m_": [], "vibrasjon": [], "co2": [], "mmlang": [], "mlang": [],
24                       "valere": [], "armering": []},
25
26                       { "mm": [], "m": [], "tap": [], "P0": [], "friktp": [], "svinntap": [], "armering": [],
27                       "Ap": [], "kryp": [], "relak": [], "låsetap": [], "ovre": [], "nedre": [], "grense_overforing": [],
28                       "REI": [], "REI_": [], "t0_": [], "m_": [], "vibrasjon": [], "co2": [], "mmlang": [], "mlang": [],
29                       "valere": [], "armering": []},
30
31                       { "mm": [], "m": [], "tap": [], "P0": [], "friktp": [], "svinntap": [], "armering": [],
32                       "Ap": [], "kryp": [], "relak": [], "låsetap": [], "ovre": [], "nedre": [], "grense_overforing": [],
33                       "REI": [], "REI_": [], "t0_": [], "m_": [], "vibrasjon": [], "co2": [], "mmlang": [], "mlang": [],
34                       "valere": [], "armering": []},
35
36                       { "mm": [], "m": [], "tap": [], "P0": [], "friktp": [], "svinntap": [], "armering": [],
37                       "Ap": [], "kryp": [], "relak": [], "låsetap": [], "ovre": [], "nedre": [], "grense_overforing": [],
38                       "REI": [], "REI_": [], "t0_": [], "m_": [], "vibrasjon": [], "co2": [], "mmlang": [], "mlang": [],
39                       "valere": [], "armering": []},
40
41                       { "mm": [], "m": [], "tap": [], "P0": [], "friktp": [], "svinntap": [], "armering": [],
42                       "Ap": [], "kryp": [], "relak": [], "låsetap": [], "ovre": [], "nedre": [], "grense_overforing": [],
43                       "REI": [], "REI_": [], "t0_": [], "m_": [], "vibrasjon": [], "co2": [], "mmlang": [], "mlang": [],
44                       "valere": [], "armering": []},
45
46                       { "mm": [], "m": [], "tap": [], "P0": [], "friktp": [], "svinntap": [], "armering": [],
47                       "Ap": [], "kryp": [], "relak": [], "låsetap": [], "ovre": [], "nedre": [], "grense_overforing": [],
48                       "REI": [], "REI_": [], "t0_": [], "m_": [], "vibrasjon": [], "co2": [], "mmlang": [], "mlang": [],
49                       "valere": [], "armering": []},
50
51                       { "mm": [], "m": [], "tap": [], "P0": [], "friktp": [], "svinntap": [], "armering": [],
52                       "Ap": [], "kryp": [], "relak": [], "låsetap": [], "ovre": [], "nedre": [], "grense_overforing": [],
53                       "REI": [], "REI_": [], "t0_": [], "m_": [], "vibrasjon": [], "co2": [], "mmlang": [], "mlang": [],
54                       "valere": [], "armering": []},
55
56                       { "mm": [], "m": [], "tap": [], "P0": [], "friktp": [], "svinntap": [], "armering": [],
57                       "Ap": [], "kryp": [], "relak": [], "låsetap": [], "ovre": [], "nedre": [], "grense_overforing": [],
58                       "REI": [], "REI_": [], "t0_": [], "m_": [], "vibrasjon": [], "co2": [], "mmlang": [], "mlang": [],
59                       "valere": [], "armering": []}]
60
61
62     total_tap_alle_dekker = []
63     meter = []
64     xx = []
65     yy = []
66     yy_frik = []
67     yy_svinntap = []
68     yy_kryp = []
69     yy_relak = []
70     yy_låsetap = []
71     yy_vibrasjon = []
72
73     As_min_krav = []
74     As_min_L = []
75     Ap Bruker = []
76     Ap_P0 = []
77
78     nedboyninger = []
79     lengde = []
80     grense = []
81     tap_forspenning = []
82     t0_verdier = []
83     sigma_ovre_graf = []
84     sigma_nedre_graf = []
85     overforing_max = []
86
87     Dekker = [{"hoyde": 200, "zc": 98.3974, "g1": 2.6,
88               "ac": 119959.4297, "iy": 0.62*10**9, "kabler": 7, "iy_påstop": 2680439606},
89
90               {"hoyde": 220, "zc": 102.9530, "g1": 3.1,
91               "ac": 146379.2960, "iy": 0.88*10**9, "kabler": 7, "iy_påstop": 3644589882},
92
93               {"hoyde": 265, "zc": 132.5216, "g1": 3.7,
94               "ac": 172397.9131, "iy": 1.53*10**9, "kabler": 6, "iy_påstop": 4976569252},
95
96               {"hoyde": 285, "zc": 135.5603, "g1": 4.2,
97               "ac": 198735.2650, "iy": 1.98*10**9, "kabler": 6, "iy_påstop": 6287956702 },
98
99               {"hoyde": 320, "zc": 157.2759, "g1": 4.2,
100              "ac": 188740.8729, "iy": 2.45*10**9, "kabler": 6, "iy_påstop": 7132684312 },
101
102              {"hoyde": 340, "zc": 159.5386, "g1": 4.7,
103              "ac": 212923.0742, "iy": 3.05*10**9, "kabler": 6, "iy_påstop": 8753722096},
104
105              {"hoyde": 400, "zc": 206.9283, "g1": 5,
106              "ac": 215624.6757, "iy": 4.4*10**9, "kabler": 5, "iy_påstop": 12166405021},
107
108              {"hoyde": 420, "zc": 202.79, "g1": 5.5,
109              "ac": 274364, "iy": 5.92*10**9, "kabler": 5, "iy_påstop": 14046948900},
110
111              {"hoyde": 500, "zc": 236.7968, "g1": 6.8,
112              "ac": 305202.6371, "iy": 9.03*10**9, "kabler": 5, "iy_påstop": 20272618449},
113
114              {"hoyde": 520, "zc": 244.5994, "g1": 7.3,
115              "ac": 311094.0677, "iy": 10.29*10**9, "kabler": 6, "iy_påstop": 22461619872}]
116
117     def finnerP(t0,L,dekke):
118         P = []
119         P_prover = []
120
121         for i in range(1, 10000, 50):
122             P_forsok = i * 1000
123
124             f_ck = 45
125             f_cm = 53
126             f_pk = 1700
127             f_p0lk = 1550
```

```

128 g1_1 = 1.2 * Dekker[dekke]["g1"]
129 g1_2 = 1.2 * 0.13 * 27
130 g2 = 3
131 E_cm = 36000
132 E_p = 195000
133
134 # Tverrsnittsvariabler
135 h = Dekker[dekke]["hoyde"]
136 zc = Dekker[dekke]["zc"]
137 Ac = Dekker[dekke]["ac"]
138 i = Dekker[dekke]["iy"]
139 antall_kabler = Dekker[dekke]["kabler"]
140
141 # Mulige armeringstyper
142 armering = [5.2, 6.5, 6.8, 7.0, 7.5, 9, 11, 12.5, 13, 15.2, 16]
143 verdige3 = []
144 verdige7 = []
145 verdige19 = []
146
147 # Min. armering
148 As_min = P_forsok / (0.95*f_p01k)
149
150 dmin_3 = (np.sqrt((As_min/antall_kabler)*(1/3)*(4/np.pi)))
151 dmin_7 = (np.sqrt((As_min/antall_kabler)*(1/7)*(4/np.pi)))
152 dmin_19 = (np.sqrt((As_min/antall_kabler)*(1/19)*(4/np.pi)))
153
154 # Bestemmer armeringsdiameter
155 for x in range(len(armering)):
156     storrelse = armering[x]
157
158     if storrelse >= dmin_3:
159         verdige3.append(storrelse)
160
161     if storrelse >= dmin_7:
162         verdige7.append(storrelse)
163
164     if storrelse >= dmin_19:
165         verdige19.append(storrelse)
166
167 #3
168 if verdige3 != []:
169     As_del_3 = 3*(np.pi/4)*(verdige3[0]*verdige3[0])
170     A_p_3 = antall_kabler * As_del_3
171
172 else:
173     As_del_3 = 3*(np.pi/4)*(100*100)
174     A_p_3 = antall_kabler * As_del_3
175
176 #7
177 As_del_7 = 7*(np.pi/4)*(verdige7[0]*verdige7[0])
178 A_p_7 = antall_kabler * As_del_7
179
180 #19
181 As_del_19 = 19*(np.pi/4)*(verdige19[0]*verdige19[0])
182 A_p_19 = antall_kabler * As_del_19
183
184 As_del = min(As_del_3, As_del_7, As_del_19)
185 A_p = antall_kabler * As_del
186
187 if As_del == As_del_3:
188     vaere = 3
189     #cmin_b = 1.5 * verdige3[0] * 1.866
190     cmin_b = max(35, 1.5 * verdige3[0] * 1.866)
191
192     e_p = zc - cmin_b - ((1.5*verdige3[0])/2)
193
194 if As_del == As_del_7:
195     vaere = 7
196     #cmin_b = 1.5 * verdige7[0] * 3
197     cmin_b = max(35, 1.5 * verdige7[0] * 3)
198
199     e_p = zc - cmin_b - ((3*verdige7[0])/2)
200
201 if As_del == As_del_19:
202     vaere = 19
203     #cmin_b = 1.5 * verdige19[0] * 5
204     cmin_b = max(35, 1.5 * verdige19[0] * 5)
205
206     e_p = zc - cmin_b - ((5*verdige19[0])/2)
207
208 #Tap pga l s
209 if P_forsok == 0:
210     P_jekk = 1000
211
212 else:
213     P_jekk = P_forsok
214
215 delta_L_10s = 5
216 delta_epsilon_10s = delta_L_10s / (L*1000)
217 epsilon_P_jekk = ((P_jekk) / (E_p * A_p))
218 delta_P_10s = (delta_epsilon_10s/epsilon_P_jekk) * P_jekk
219 tap_10s_prosent = (delta_P_10s/P_jekk) * 100
220
221 #Tap friksjon
222 my_frik = 0.19
223 k_frik = 0.005
224 theta_A = (2*e_p)/((L*1000)/2)
225 theta_B = (2*e_p)/((L*1000)/2)
226 theta_midt = 0
227 theta_L = theta_A + theta_B
228
229 delta_P_friksjon = (P_forsok) * (1 - np.exp(-my_frik*(theta_L+k_frik*((L*1000)*10**(-3))))))
230 friksjonstap_prosent = (delta_P_friksjon/P_forsok)*100
231
232 P_forsok_2 = P_forsok - delta_P_friksjon - delta_P_10s
233 tap_friksjon_prosent = (delta_P_friksjon/P_forsok)*100
234
235 # Transformert tverrsnitt for beregninger av laster i tverrsnitt ved overforing (SLS)
236 B_cc_t0 = np.e**(0.2*(1-(28/t0)**0.5))
237 f_cm_t0 = B_cc_t0 * f_cm
238 E_cm_t0 = (f_cm_t0 / f_cm)**0.3 * E_cm
239 n = E_p / E_cm_t0
240 A_t = Ac + (n-1)*A_p
241 yt = (n-1)*A_p*(e_p/A_t)
242 It = i + Ac*yt**2 + (n-1)*A_p*(e_p-yt)**2
243
244 # Laster på tverrsnitt og maks spenning ved overforing
245 sigma_max = 0.7 * (f_cm_t0 - 8)
246 M_egen = (g1_1 * L**2) / 8 * 10**6
247 N = -P_forsok_2
248 M = N * (e_p-yt)
249 M_e = N * (-yt)
250
251 # Lastfordelinger i tverrsnitt ved overforing
252
253 # Nedre ende

```

```

256 sigma_ende_overforing = (N/A_t) + ((M_e-N*yt)/It)*(zc-yt)
257
258 # ovre midt
259 sigma_ovre_overforing = (N/A_t)+((M+M_egen)-N*yt)/It)*(-h-zc)-yt)
260
261 # Nedre midt
262 sigma_nedre_overforing = (N/A_t)+((M+M_egen)-N*yt)/It)*(zc-yt)
263
264 if np.abs(sigma_nedre_overforing) < sigma_max:
265     P.append(P_forsok_2)
266     P_prover.append(P_forsok)
267 elif P == []:
268     return [0], [0]
269 else:
270     return P, P_prover
271 break
272
273
274 def Nedboying(L,dekke, p_test):
275
276     #P0 = finnerP(t0,L,dekke)[1][p_test]
277     P0 = max(1, finnerP(t0,L,dekke)[1][p_test])
278
279     f_ck = 45
280     f_cm = 53
281     f_pk = 1700
282     f_p01k = 1550
283     g1_1 = 1.2 * Dekker[dekke]["g1"]
284     g1_2 = 1.2 * 0.13 * 27
285     g1_2_mindre_p01stop = 1.2 * 0.05 * 27
286     g2 = 3
287     E_cm = 36000
288     E_p = 195000
289
290     # TverrsnittsvARIABLER
291     h = Dekker[dekke]["hoyde"]
292     zc = Dekker[dekke]["zc"]
293     Ac = Dekker[dekke]["ac"]
294     i = Dekker[dekke]["iy"]
295     antall_kabler = Dekker[dekke]["kabler"]
296
297     # Mulige armeringstyper
298     armering = [5.2, 6.5, 6.8, 7.0, 7.5, 9, 11, 12.5, 13, 15.2, 16]
299     verdige3 = []
300     verdige7 = []
301     verdige19 = []
302
303     # Min. armering
304     As_min = P0/(0.95*f_p01k)
305
306     dmin_3 = (np.sqrt((As_min/antall_kabler)*(1/3)*(4/np.pi)))
307     dmin_7 = (np.sqrt((As_min/antall_kabler)*(1/7)*(4/np.pi)))
308     dmin_19 = (np.sqrt((As_min/antall_kabler)*(1/19)*(4/np.pi)))
309
310     # Bestemmer armeringsdiameter
311     for x in range(len(armering)):
312         storrelse = armering[x]
313
314         if storrelse >= dmin_3:
315             verdige3.append(storrelse)
316
317
318         if storrelse >= dmin_7:
319             verdige7.append(storrelse)
320
321
322         if storrelse >= dmin_19:
323             verdige19.append(storrelse)
324
325
326     #3
327     if verdige3 != []:
328         As_del_3 = 3*(np.pi/4)*(verdige3[0]*verdige3[0])
329         A_p_3 = antall_kabler * As_del_3
330
331     else:
332         As_del_3 = 3*(np.pi/4)*(100*100)
333         A_p_3 = antall_kabler * As_del_3
334
335     #7
336     As_del_7 = 7*(np.pi/4)*(verdige7[0]*verdige7[0])
337     A_p_7 = antall_kabler * As_del_7
338
339     #19
340     As_del_19 = 19*(np.pi/4)*(verdige19[0]*verdige19[0])
341     A_p_19 = antall_kabler * As_del_19
342
343     As_del = min(As_del_3, As_del_7, As_del_19)
344     A_p = antall_kabler * As_del
345
346     if As_del == As_del_3:
347         vaiere = 3
348         #cmin_b = 1.5 * verdige3[0] * 1.5
349         cmin_b = max(35, 1.5 * verdige3[0] * 1.5)
350
351         e_p = zc - cmin_b - ((1.5*verdige3[0])/2)
352         diameter = verdige3[0]
353
354         REI = brannkrav(dekke, e_p, antall_kabler, L, verdige3[0], cmin_b, vaiere)[0]
355         REI_justert = brannkrav(dekke, e_p, antall_kabler, L, verdige3[0], cmin_b, vaiere)[1]
356         moment = brannkrav(dekke, e_p, antall_kabler, L, verdige3[0], cmin_b, vaiere)[2]
357
358     if As_del == As_del_7:
359         vaiere = 7
360         #cmin_b = 1.5 * verdige7[0] * 3
361         cmin_b = max(35, 1.5 * verdige7[0] * 3)
362
363         e_p = zc - cmin_b - ((3*verdige7[0])/2)
364         diameter = verdige7[0]
365
366         REI = brannkrav(dekke, e_p, antall_kabler, L, verdige7[0], cmin_b, vaiere)[0]
367         REI_justert = brannkrav(dekke, e_p, antall_kabler, L, verdige7[0], cmin_b, vaiere)[1]
368         moment = brannkrav(dekke, e_p, antall_kabler, L, verdige7[0], cmin_b, vaiere)[2]
369
370     if As_del == As_del_19:
371         vaiere = 19
372         #cmin_b = 1.5 * verdige19[0] * 5
373         cmin_b = max(35, 1.5 * verdige19[0] * 5)
374
375         e_p = zc - cmin_b - ((5*verdige19[0])/2)
376         diameter = verdige19[0]
377
378         REI = brannkrav(dekke, e_p, antall_kabler, L, verdige19[0], cmin_b, vaiere)[0]
379         REI_justert = brannkrav(dekke, e_p, antall_kabler, L, verdige19[0], cmin_b, vaiere)[1]
380         moment = brannkrav(dekke, e_p, antall_kabler, L, verdige19[0], cmin_b, vaiere)[2]
381
382     resonans = vibrasjon(L, dekke, E_cm, g1_1, g1_2, g1_2_mindre_p01stop)

```

```

384
385 #Tap pga l s
386 if P0 == 0:
387     P_jekk = 1
388 else:
389     P_jekk = P0
390 delta_L_1[0] = 5
391 delta_epsilon_1[0] = delta_L_1[0] / (L*1000)
392 epsilon_P_jekk = (P_jekk / (E_p * A_p))
393 delta_P_1[0] = (delta_epsilon_1[0] * epsilon_P_jekk) * P_jekk
394 tap_1[0] = (delta_P_1[0] / P_jekk) * 100
395
396 #Tap friksjon
397 my_frik = 0.19
398 k_frik = 0.005
399 theta_A = (2*e_p) / ((L*1000)/2)
400 theta_B = (2*e_p) / ((L*1000)/2)
401 theta_midt = 0
402 theta_L = theta_A + theta_B
403
404 delta_P_friksjon = P0 * (1 - np.exp(-my_frik*(theta_L+k_frik*(L*1000)*10**(-3))))
405 friksjonstap_prosent = (delta_P_friksjon/P0)*100
406
407 P = P0 - delta_P_friksjon - delta_P_1[0]
408 tap_friksjon_prosent = (delta_P_friksjon/P0)*100
409
410 # Transformert tverrsnitt for beregninger av laster i tverrsnitt ved overføring (SLS)
411 B_cc_t0 = np.e**(0.2*(1-(28/t0)**0.5))
412 f_cm_t0 = B_cc_t0 * f_cm
413 E_cm_t0 = (f_cm_t0 / f_cm)**0.3 * E_cm
414 n = E_p / E_cm_t0
415 A_t = Ac + (n-1)*A_p
416 yt = (n-1)*A_p*(e_p/A_t)
417 It = 1 + Ac*yt**2 + (n-1)*A_p*(e_p-yt)**2
418
419 # Laster på tverrsnitt og maks spenning ved overføring
420 sigma_max = 0.7 * (f_cm_t0 - 8)
421 M_egen = (g1_1 * L**2) / 8 * 10**6
422 N = -P
423 M = N * (e_p-yt)
424 M_e = N * (-yt)
425
426 # Lastfordelinger i tverrsnitt ved overføring
427 sigma_ende_overforing = (N/A_t) + ((M_e-N*yt)/It)*(zc-yt)
428
429 # ovre midt
430 sigma_ovre_overforing = (N/A_t) + ((M+M_egen)-N*yt)/It * (- (h-zc) -yt)
431
432 # Nedre midt
433 sigma_nedre_overforing = (N/A_t) + ((M+M_egen)-N*yt)/It * (zc-yt)
434
435 # Langtidsvirkninger
436
437 # Effektiv E-modul
438
439 alfa_1 = (35/f_cm)**0.7
440 alfa_2 = (35/f_cm)**0.2
441 alfa_3 = (35/f_cm)**0.5
442
443 u = 1200
444 h_0 = (2*Ac)/u
445 RH = 40
446
447 def B_H(h_0, alfa_3, RH):
448     if True:
449         B_H = 1.5 * (1 + (0.012*RH)**18) * h_0 + 250 * alfa_3
450         if B_H <= 1500 * alfa_3:
451             return B_H
452         else:
453             return 1500 * alfa_3
454
455 BH = B_H(h_0, alfa_3, RH)
456
457 Bc_t_t0 = 1
458 B_fcm = 16.8/np.sqrt(f_cm)
459 B_3 = 1 / (1 + t0**0.2)
460 B_28 = 1 / (1 + 28**0.2)
461 B_180 = 1 / (1 + 180**0.2)
462
463 phi_RH = (1 + ((1-(RH/100)) / (0.1*h_0**(1/3)))) * alfa_1 * alfa_2
464
465 # phi(t)
466 phi_0_3 = phi_RH * B_fcm * B_3
467 phi_0_28 = phi_RH * B_fcm * B_28
468 phi_0_180 = phi_RH * B_fcm * B_180
469
470 # Kryptall
471 phi_3 = phi_0_3
472 phi_28 = phi_0_28
473 phi_180 = phi_0_180
474
475 # Effektiv E-modul
476 E_cl3 = E_cm / (1 + phi_3)
477 E_cl28 = E_cm / (1 + phi_28)
478 E_cl180 = E_cm / (1 + phi_180)
479
480 # Laster
481 M_p = - P * e_p
482 M_g1_1 = ((g1_1 * L**2) / 8) * 10**6
483 M_g1_2 = ((g1_2 * L**2) / 8) * 10**6
484 M_g2_perm = ((0.5 * g2 * L**2) / 8) * 10**6
485 M_g2_var = ((0.5 * g2 * L**2) / 8) * 10**6
486
487 # For spenninger i tverrsnittet etter lang tid
488 M_laster_langtid = M_g1_1 + M_g1_2 + M_g2_perm
489
490 # Gjennomsnittlig E-modul
491 over_br_ek = ((np.abs(M_p)) + (np.abs(M_g1_1)) + (np.abs(M_g1_2)) + (np.abs(M_g2_perm)) + (np.abs(M_g2_var)))
492 under_br_ek = (( (np.abs(M_p)) / (E_cl3)) + ((np.abs(M_g1_1)) / (E_cl3)) + ((np.abs(M_g1_2)) / (E_cl28)) +
493              ((np.abs(M_g2_perm)) / (E_cl180)) + ((np.abs(M_g2_var)) / (E_cm)) )
494 E_middel = over_br_ek / under_br_ek
495
496 # Justert transformert tverrsnitt mhp kryp
497 kryp_n = E_p / E_middel
498 kryp_A_t = Ac + (kryp_n-1)*A_p
499 kryp_yt = (kryp_n-1)*A_p*(e_p/kryp_A_t)
500 kryp_It = 1 + Ac*kryp_yt**2 + (kryp_n-1)*A_p*(e_p-kryp_yt)**2
501 # Justerte laster
502 M_kryp = N * (e_p-kryp_yt)
503 M_e_kryp = N * (-kryp_yt)
504
505 # Spenningsfordeling mhp kryp, langtid
506
507 # Nedre ende
508 sigma_ende_kryp = (N/kryp_A_t) + ((M_e_kryp-N*kryp_yt)/kryp_It)*(zc-kryp_yt)
509 #print('sigma_nedre_ende_kryp =',round(sigma_ende_kryp,3),'MPa')
510
511 # ovre midt

```

```

512 sigma_ovre_kryp = (N/kryp_A_t)+((M_kryp+M_laster_langtid)-N*kryp_yt)/kryp_it)^(-(h-zc)-kryp_yt)
513 #print('sigma_ovre_midt_kryp =',round(sigma_ovre_kryp,3),'MPa')
514
515 # Nedre midt
516 sigma_nedre_kryp = (N/kryp_A_t)+((M_kryp+M_laster_langtid)-N*kryp_yt)/kryp_it)^(zc-kryp_yt)
517 #print('sigma_nedre_midt_kryp =',round(sigma_nedre_kryp,3),'MPa')
518
519 # Armering
520 sigma_Pk = (N/A_t)+((M+M_laster_langtid)-N*yt)/It)^(e_p-yt)
521 sigma_PL = (N/kryp_A_t)+((M_kryp+M_laster_langtid)-N*kryp_yt)/kryp_it)^(e_p-kryp_yt)
522 epsilon_k = sigma_Pk / E_cm
523 epsilon_L = sigma_PL / E_middel
524 delta_sigma_P_kryp = (epsilon_L - epsilon_k) * E_p
525 delta_P_kryp = delta_sigma_P_kryp * A_p
526 tap_kryp_prosent = -(delta_P_kryp/P0)*100
527
528 # Svinn - Antar sementklasse R
529 alfa_dsl = 6
530 alfa_ds2 = 0.11
531 f_cm0 = 10
532 RH_0 = 100
533 B_RH = 1.55 * (1-(RH/RH_0)**3)
534
535 epsilon_cd0 = 0.85 * ( (220+110*alfa_dsl)*np.e**(-alfa_ds2*(f_cm/f_cm0)) ) * 10**(-6) * B_RH
536
537 k_h = 0.717
538 B_ds_t_ts = 1
539 epsilon_cd_t = B_ds_t_ts * k_h * epsilon_cd0
540 epsilon_ca_t = 2.5 * (f_ck - 10) * 10**(-6)
541 epsilon_cs_t = - (epsilon_cd_t + epsilon_ca_t)
542
543 # Krefter grunnt svinn
544 N_s = - epsilon_cs_t * E_p * A_p
545 M_s = N_s * (e_p - kryp_yt)
546
547 # Endring av spenning i tverrsnittet grunnet svinn
548
549 # ovre midt
550 delta_sigma_ovre_midt_svinn = (N_s / (kryp_A_t)) + (M_s / (kryp_it))^(-(h-zc)-kryp_yt)
551
552 # Nedre Midt
553 delta_sigma_nedre_midt_svinn = (N_s / (kryp_A_t)) + (M_s / (kryp_it))^(zc-kryp_yt)
554
555 # Armering
556 epsilon_c_s_e = epsilon_cs_t + N_s/(E_middel * kryp_A_t) + M_s/(E_middel * kryp_it)^*(e_p-kryp_yt)
557 delta_sigma_P_s = epsilon_c_s_e * E_p
558 delta_P_svinn = delta_sigma_P_s * A_p
559 tap_svinn_prosent = -(delta_P_svinn / P0)*100
560
561 # Relaksasjon
562 rho_1000 = 2.5
563 sigma_pm0 = 1275
564 my = sigma_pm0 / f_pk
565 t = 500000
566 delta_sigma_pr = 0.8 * (sigma_pm0 * 0.66 * rho_1000 * np.e**(9.1*my) * (t/1000)**(0.75*(1-my))) * 10**(-5))
567
568 # Laster pga relaksasjon
569 N_r = delta_sigma_pr * A_p
570 M_r = N_r * (e_p - kryp_yt)
571
572 # Endring av spenning i tverrsnittet grunnet relaksasjon
573
574 # ovre midt
575 delta_sigma_ovre_midt_relaksasjon = (N_r / (kryp_A_t)) + (M_r / (kryp_it))^(-(h-zc)-kryp_yt)
576
577 # Nedre midt
578 delta_sigma_nedre_midt_relaksasjon = (N_r / (kryp_A_t)) + (M_r / (kryp_it))^(zc-kryp_yt)
579
580 # Armering
581 delta_sigma_armering = -delta_sigma_pr
582 delta_P_relaksasjon = delta_sigma_armering * A_p
583 if P0 == 0:
584     P0 = 1
585     tap_relak_prosent = -(delta_P_relaksasjon / P0) * 100
586 else:
587     tap_relak_prosent = -(delta_P_relaksasjon / P0) * 100
588
589 # Endelig spenning i tverrsnittet etter lang tid
590
591 # ovre midt
592 sigma_endelig_ovre = sigma_ovre_kryp + delta_sigma_ovre_midt_svinn + delta_sigma_ovre_midt_relaksasjon
593
594 # Nedre midt
595 sigma_endelig_nedre = sigma_nedre_kryp + delta_sigma_nedre_midt_svinn + delta_sigma_nedre_midt_relaksasjon
596
597 # Armering
598 P_endelig = P + delta_P_kryp + delta_P_svinn + delta_P_relaksasjon
599
600
601 # Nedboying i tverrsnittet etter lang tid
602 qed = 1.2*(g1_l1 + g1_2) + 1.5*(g2)
603 q_forspenning = (8 * P_endelig * e_p) / (L*10**3)**2
604
605 #Beregning av nedboying
606 def nedboying(p):
607     return (5*p*(L*10**3)**4)/(384*E_middel*It)
608
609 #Total nedboying, total tap
610 tot_nedboying = nedboying(qed) - nedboying(q_forspenning)
611 total_tap_P = (1 - P_endelig/P0) * 100
612
613 E_dyn = 1.175 * E_cm
614 i_p_stopt = 11.1 * 10**9
615 m_p_stopt = ((g1_l1+g1_2)*1000)/9.81
616 fL = (np.pi/(2*L**2)) * (np.sqrt((E_dyn*10**6*i_p_stopt*10**(-12))/m_p_stopt))
617
618 t0_verdier.append(t0)
619 tap_forspenning.append(total_tap_P)
620 sigma_ovre_graf.append(sigma_endelig_ovre)
621 sigma_nedre_graf.append(sigma_endelig_nedre)
622
623 co2 = kg_co2(dekke, A_p)
624
625 return(tot_nedboying, total_tap_P, P0, tap_friksjon_prosent, tap_svinn_prosent, As_min, A_p, tap_kryp_prosent,
626        tap_relak_prosent, tap_Lf_prosent, sigma_ovre_overforing, sigma_nedre_overforing, f_cm_t0,REI, REI_justert,
627        resonans, co2, sigma_endelig_nedre, sigma_endelig_ovre, diameter, vaiere)
628
629 def kg_co2(dekke, A_p):
630     kubikk_sement = (Dekker[dekke]["ac"] / 10**6) * 0.135 #13.5% sement i betongen
631     tonn_sement = kubikk_sement * 1.44 #1.44 tonn sement per kubikk
632     tonn_co2_sement = tonn_sement * 0.8 #0.8 tonn co2 per tonn sement produsert
633
634     kubikk_armering = (A_p / 10**6)
635     tonn_armering = kubikk_armering * 7.85 #7.85 tonn per kubikk
636     tonn_co2_armering = tonn_armering * 5.64 #5.64 tonn co2 per tonn armering produsert
637
638     total_co2 = (tonn_co2_sement + tonn_co2_armering) * 1000 #kilo
639

```



```

650     return total_coz
651
652 def brannkrav(dekke, e_p, antall_kabler, L, diameter, cmin_b, vaiere):
653     z1 = (Dekker[dekke]["hoyde"] - Dekker[dekke]["zc"]) / 2
654     z2 = e_p
655     z = z1 + z2
656     r = diameter / 2
657
658     g1_1 = 1.2 * Dekker[dekke]["g1"]
659     g1_2 = 1.2 * 0.13 * 27
660     g2 = 3
661     qed = 1.2 * g1_1 + 1.2 * g1_2 + 1.5 * g2
662
663     motstand = [{"rei": 30, "hekv": 60, "dybde": 25},
664                 {"rei": 60, "hekv": 80, "dybde": 35},
665                 {"rei": 90, "hekv": 100, "dybde": 45},
666                 {"rei": 120, "hekv": 120, "dybde": 55},
667                 {"rei": 180, "hekv": 150, "dybde": 70},
668                 {"rei": 240, "hekv": 175, "dybde": 80}]
669
670     motstand_justert = [{"rei": 30, "hekv": 60, "dybde": 0},
671                        {"rei": 60, "hekv": 80, "dybde": 0},
672                        {"rei": 90, "hekv": 100, "dybde": 0},
673                        {"rei": 120, "hekv": 120, "dybde": 0},
674                        {"rei": 180, "hekv": 150, "dybde": 0},
675                        {"rei": 240, "hekv": 175, "dybde": 0}]
676
677     Fp = (vaiere*np.pi*r**2) * (1550 / 1.15)
678     Sd = antall_kabler * Fp
679     Md = Sd * (z/1000)
680     Med = qed * (L**2 / 8)
681     theta0 = 350
682     h_ekv = Dekker[dekke]["ac"] / 1200
683     moment = ""
684
685     a_dybde = cmin_b
686
687     if Med <= Md:
688         moment = "ok"
689     else:
690         moment = "ikke ok"
691
692     rei = [0]
693     rei_ = [0]
694
695     for minutt in range(0,6):
696         if h_ekv >= motstand[minutt]["hekv"] and a_dybde >= motstand[minutt]["dybde"]:
697             rei.append(motstand[minutt]["rei"])
698
699     ### JUSTERT ARMERINGSDYBDE
700     qed_fi = g1_1 + g1_2 + (0.3 * g2)
701     Med_fi = qed_fi * (L**2 / 8)
702     fd_fi = 1550
703     Md_fi = (antall_kabler * fd_fi * (vaiere*np.pi*r**2) * (z/1000)) / 1000
704
705     my_fi = Med_fi / Md_fi
706
707     def myGraf(my_fi):
708         return -140.625 * my_fi**2 - 300 * my_fi + 590.625
709
710     if my_fi >= 0.2 and my_fi <= 1:
711         thetakrit = myGraf(my_fi)
712         justering = (theta0 - thetakrit) / 10
713
714     for minutt in range(0,6):
715         motstand_justert[minutt]["dybde"] = motstand[minutt]["dybde"] + justering
716
717         if h_ekv >= motstand_justert[minutt]["hekv"] and a_dybde >= motstand_justert[minutt]["dybde"]:
718             rei_.append(motstand[minutt]["rei"])
719
720     return rei[-1], rei_[-1], moment
721
722 def vibrasjon(L, dekke, Ecm, g1_1, g1_2, g1_2_mindre_pstop):
723     g = 9.81
724     vekt = (1000 * (g1_1 + g1_2)) / g
725     Edyn = 1.175 * Ecm * 10 **6
726     fl_hd = (np.pi / (2*L**2)) * np.sqrt((Edyn*Dekker[dekke]["iy_pastop"] * 10**(-12))/(vekt))
727     return fl_hd
728
729 for x in range(50,250):
730     print(str(round((x/250)*100) + "%"))
731     for k in range(0,10):
732         dekke = k
733
734         for p_test in range(len(finnerP(t0, x/10, dekke)[1])):
735             if Nedboying(x/10, dekke, p_test)[0] <= (x*100)/250 and Nedboying(x/10, dekke, p_test)[13] >= 0:
736
737                 if Nedboying(x/10, dekke, p_test)[0] >= 0.5:
738                     if Nedboying(x/10, dekke, p_test)[17] <= 2.7 and Nedboying(x/10, dekke, p_test)[18] >= -45:
739                         boying = Nedboying(x/10, dekke, p_test)[0]
740                         nedboyingner.append(boying)
741
742                         plotteGrenser[k]["nm"].append(boying)
743                         plotteGrenser[k]["m"].append(x/10)
744
745                         #KODE FOR TAP MOT P
746                         plotteGrenser[k]["P0"].append(Nedboying(x/10, dekke)[2]/1000)
747
748                         #KODE FOR TAP MOT L
749                         plotteGrenser[k]["Tap"].append(Nedboying(x/10, dekke, p_test)[1])
750                         yy.append(Nedboying(x/10, dekke, p_test)[1])
751                         xx.append(x/10)
752
753                         #KODE FOR FRIKSJON MOT L
754                         plotteGrenser[k]["frikap"].append(Nedboying(x/10, dekke)[3])
755                         yy_frik.append(Nedboying(x/10, dekke)[3])
756
757                         #KODE FOR SVINN MOT L
758                         plotteGrenser[k]["svinntap"].append(Nedboying(x/10, dekke)[4])
759                         yy_svinn.append(Nedboying(x/10, dekke)[4])
760
761                         #KODE FOR MIN ARMERING MOT L
762                         plotteGrenser[k]["armering"].append(Nedboying(x/10, dekke)[5])
763                         plotteGrenser[k]["Ap"].append(Nedboying(x/10, dekke)[6])
764
765                         #KODE FOR KRYP MOT L
766                         plotteGrenser[k]["kryp"].append(Nedboying(x/10, dekke)[7])
767                         yy_kryp.append(Nedboying(x/10, dekke)[7])
768
769                         #KODE FOR RELAKSASJON MOT L
770                         plotteGrenser[k]["relaks"].append(Nedboying(x/10, dekke)[8])

```

```

769     yy_relak.append(Nedboyingning(x/10, dekke) [8])
770
771     #KODE FOR LÅSETAP MOT L
772     plotteGrenser[k]["lasetap"].append(Nedboyingning(x/10, dekke) [9])
773     yy_lasetap.append(Nedboyingning(x/10, dekke) [9])
774
775     #KODE FOR SPENNING MOT L ØVRE
776     plotteGrenser[k]["ovre"].append(Nedboyingning(x/10, dekke) [10])
777
778     #KODE FR SPENNING MOT L NEDRE
779     plotteGrenser[k]["nedre"].append(Nedboyingning(x/10, dekke) [11])
780     plotteGrenser[k]["grense_overforing"].append(Nedboyingning(x/10, dekke) [12])
781
782     lengde.append(x/10)
783     overforing_max.append(-(0.7 * (Nedboyingning(x/10, dekke) [12] - 8)))
784
785     plotteGrenser[k]["REI"].append(Nedboyingning(x/10, dekke, p_test) [13])
786     if Nedboyingning(x/10, dekke, p_test) [14] >= Nedboyingning(x/10, dekke, p_test) [13]: #!= 0:
787         plotteGrenser[k]["REI"].append(Nedboyingning(x/10, dekke, p_test) [14])
788         plotteGrenser[k]["m"].append(x/10)
789
790     plotteGrenser[k]["vibrasjon"].append(Nedboyingning(x/10, dekke) [15])
791     yy_vibrasjon.append(Nedboyingning(x/10, dekke) [15])
792
793     plotteGrenser[k]["co2"].append(Nedboyingning(x/10, dekke, p_test) [16])
794     plotteGrenser[k]["vaiere"].append(Nedboyingning(x/10, dekke, p_test) [20])
795     plotteGrenser[k]["armering"].append(Nedboyingning(x/10, dekke, p_test) [19])
796     break
797
798     """
799     plt.figure(dpi=1200)
800
801     #PLOTTE KULT REGNBUE TRE
802     gs = gridspec.GridSpec(1, 2, width_ratios=[2, 1])
803     #fig = plt.figure(figsize=(80, 60))
804     plt.subplot(gs[0])
805
806     farger = ["red", "green", "blue", "black", "magenta", "orange", "limegreen", "cyan", "saddlebrown", "pink"]
807     #plt.figure(dpi=1200)
808
809     for dekke in range(0,10):
810         if plotteGrenser[dekke]["m"] != []:
811             plt.plot(plotteGrenser[dekke]["m"], plotteGrenser[dekke]["co2"], color = farger[dekke]#, label = "HD" + str(Dekker[dekke]["hoyde"]) + " - " + str(round(plotte
812             #plt.text(plotteGrenser[dekke]["m"][-1] + 0.05, plotteGrenser[dekke]["co2"][-1]-0.2, "HD" + str(Dekker[dekke]["hoyde"]), fontsize = 6)
813             #plt.text(plotteGrenser[dekke]["t0"][-1] + 0.5, plotteGrenser[dekke]["co2"][-1]-0.2, str(plotteGrenser[dekke]["vaiere"][-1]) + "x" + str(plotteGrenser[dekke]["m
814             #plt.text(plotteGrenser[dekke]["t0"][0] -0.5, plotteGrenser[dekke]["co2"][0]-0.2, str(plotteGrenser[dekke]["vaiere"][0]) + "x" + str(plotteGrenser[dekke]["arme
815
816     plt.grid()
817     plt.xlabel("Lengde på hulldekke [meter]")
818     plt.ylabel("CO2-utslipp ved produksjon [kg-CO2-ekv]")
819     plt.title("CO2-utslipp avhengig av L ved t0 = " + str(t0))
820     plt.xticks(np.arange(5, 27, 5))
821     plt.yticks(np.arange(0, 350, 50))
822     plt.ylim(0,350)
823     plt.xlim(5,27)
824
825     #plt.figure(dpi=1200)
826
827     plt.subplot(gs[1])
828     #Dekker = ["HD200", "HD220", "HD265", "HD285", "HD320", "HD340", "HD400", "HD420", "HD500", "HD520"]
829     farger = ["red", "green", "blue", "black", "magenta", "orange", "limegreen", "cyan", "saddlebrown", "pink"]
830     for dekke in range(0,10):
831         strek= [1,1]
832         hoyde =[(20.1-dekke*2), (21.3-dekke*2)]
833
834         plt.plot(strek, hoyde, color=farger[dekke])
835         plt.text(4, (20.8-dekke*2), ("HD" +str(Dekker[dekke]["hoyde"]) + " - Ap: " + str(Dekker[dekke]["kabler"])+ "x" + str(plotteGrenser[dekke]["vaiere"][-1]) + "x" +
836         plt.text(4, (20.2-dekke*2), (str(round(plotteGrenser[dekke]["co2"][-1], 2)) + " kg CO2-ekv"), fontsize = 6)
837         plt.text(-0.4, (20.5-dekke*2), str(plotteGrenser[dekke]["m"][-1]) + "m", fontsize =7, horizontalalignment='right')
838
839     plt.axis("off")
840     plt.title("Lengste dekkelengde:")
841     plt.xlim(0,50)
842     plt.ylim(0,21.5)
843     plt.tight_layout()
844
845     plt.show()
846     """
847
848     farger = ["red", "green", "blue", "black", "magenta", "orange", "limegreen", "cyan", "saddlebrown", "pink"]
849
850     regnbue = [{"farger": [], "co2": [], "m": []}]
851
852     matrise = [{"t0": t0, "dekke": 200, "lengder": [], "co2": [], "farge": "red"},
853     {"t0": t0, "dekke": 220, "lengder": [], "co2": [], "farge": "green"},
854     {"t0": t0, "dekke": 265, "lengder": [], "co2": [], "farge": "blue"},
855     {"t0": t0, "dekke": 285, "lengder": [], "co2": [], "farge": "black"},
856     {"t0": t0, "dekke": 320, "lengder": [], "co2": [], "farge": "magenta"},
857     {"t0": t0, "dekke": 340, "lengder": [], "co2": [], "farge": "orange"},
858     {"t0": t0, "dekke": 400, "lengder": [], "co2": [], "farge": "limegreen"},
859     {"t0": t0, "dekke": 420, "lengder": [], "co2": [], "farge": "cyan"},
860     {"t0": t0, "dekke": 500, "lengder": [], "co2": [], "farge": "saddlebrown"},
861     {"t0": t0, "dekke": 520, "lengder": [], "co2": [], "farge": "pink"}]
862
863     matrise520 = {"t0": t0, "dekke": 520, "lengder": [], "co2": [], "farge": "red"}
864
865     laveste = []
866     laveste_m = []
867     for num in range(len(plotteGrenser[9]["m"])):
868         current = 500
869         current_m = 0
870         current_color = int(0)
871         for dekke in range(0,10):
872             if dekke == 9:
873                 try:
874                     matrise520["lengder"].append(plotteGrenser[dekke]["m"][num])
875                     matrise520["co2"].append(plotteGrenser[dekke]["co2"][num])
876                 except IndexError:
877                     yeet = 0
878
879             try:
880                 if plotteGrenser[dekke]["co2"][num] < current:
881                     current = plotteGrenser[dekke]["co2"][num]
882                     current_m = plotteGrenser[dekke]["m"][num]
883                     current_color = int(dekke)
884                 except IndexError:
885                     current = current
886                     current_m = current_m
887                     current_color = current_color
888             laveste.append(current)
889             laveste_m.append(current_m)
890             #print(num, current_color)
891             regnbue[0]["farger"].append(current_color)
892             regnbue[0]["co2"].append(current)
893             regnbue[0]["m"].append(current_m)

```

```

897     matrise[current_color]["lengder"].append(current_m)
898     matrise[current_color]["co2"].append(current)
899
900 forste = 0
901 siste = 0
902
903 for num in range(len(regnbue[0]["m"])):
904     farge = regnbue[0]["farger"][num]
905     sistefarge = regnbue[0]["farger"][num-1]
906     co2 = regnbue[0]["co2"][num]
907     co2_forrige = regnbue[0]["co2"][num-1]
908     try:
909         co2_neste = regnbue[0]["co2"][num+1]
910     except IndexError:
911         co2_neste = co2
912     m = regnbue[0]["m"][num]
913
914     if co2 > co2_forrige:
915         forste = num
916         #print("no")
917         #print(forste, siste)
918     if co2_neste > co2 or num == len(regnbue[0]["m"]) - 1:
919         siste = num
920         #print("yo")
921         #print(forste,siste)
922
923     xx = [regnbue[0]["m"][forste], regnbue[0]["m"][siste]]
924     yy = [regnbue[0]["co2"][forste], regnbue[0]["co2"][siste]]
925
926     #plt.plot(xx,yy, color = farger[farge])
927
928     #plt.plot(regnbue[0]["m"][num], regnbue[0]["co2"][num], "_", markersize = 10, color = farger[farge])
929
930
931
932     if regnbue[0]["co2"][num] != regnbue[0]["co2"][num-1] and num != 0:
933         x = [regnbue[0]["m"][num-1], regnbue[0]["m"][num]]
934         y = [regnbue[0]["co2"][num-1], regnbue[0]["co2"][num]]
935
936         #plt.plot(x,y, color = farger[sistefarge])
937
938
939     #print(regnbue[0]["farger"])
940     #laveste_m.sort()
941     #laveste.sort()
942     #plt.plot(laveste_m, laveste, color = "black", linestyle="--")
943     #print(laveste_m, laveste)
944
945     #print(regnbue[0]["m"])
946
947     """
948     plt.xlabel("t0 [dager]")
949     plt.ylabel("Nedboyning [mm]")
950     plt.title("Nedboyning avhengig av t0 ved L = " + str(L))
951     """
952     """
953     #plt.axhline(y=(L*4), color='red', linestyle='--', label = "Grense")
954     plt.xlim(5, 26)
955     #plt.ylim(30,250)
956     #plt.ylim(50,170)
957     #plt.legend(loc = "upper left", fontsize = 6)
958     #plt.ylim(-20,100)
959
960     plt.subplot(gs[1])
961
962     for dekke in range(0,10):
963         if plotteGrenser[dekke]["m"] != []:
964
965             strek= [1,1]
966             hoyde =[(20.1-dekke*2), (21.3-dekke*2)]
967
968             plt.plot(strek, hoyde, color=farger[dekke])
969             #plt.text(4, (20.8-dekke*2), ("HD" +str(Dekker[dekke]["hoyde"])), fontsize=6)
970             plt.text(-0.4, (20.5-dekke*2), str(plotteGrenser[dekke]["m"][-1]) + "mm", fontsize=7, horizontalalignment='right')
971             plt.text(4, (20.8-dekke*2), ("HD" +str(Dekker[dekke]["hoyde"]) + " - Ap: " + str(Dekker[dekke]["kabler"])+ "x" + str(plotteGrenser[dekke]["vaiere"][-1]) + "x" +
972             plt.text(4,(20.2-dekke*2), (str(round(plotteGrenser[dekke]["co2"][-1], 2)) + " kg CO2-ekv"), fontsize = 6)
973
974             plt.axis("off")
975             plt.xlim(0,50)
976             plt.ylim(0,21.5)
977             plt.title("Lengste dekkelengde:")
978
979             plt.tight_layout()
980
981             plt.show()
982             """
983
984     farger = ["red", "green", "blue", "black", "magenta", "orange", "limegreen", "cyan", "saddlebrown", "pink"]
985
986     #PLOTTE SPENNING MOT L
987     for dekke in range(0,10):
988         plt.plot(plotteGrenser[dekke]["m"], plotteGrenser[dekke]["mm"], color = farger[dekke], label=("HD" + str(Dekker[dekke]["hoyde"]) + " - " + str(plotteGrenser[dekke]
989         #plt.text(plotteGrenser[dekke]["m"][-1]-0.4, (plotteGrenser[dekke]["m"][-1]*4)+4, "HD" + str(Dekker[dekke]["hoyde"]), fontsize = 5)
990         #plt.text(plotteGrenser[dekke]["m"][-1], -2, str(plotteGrenser[dekke]["mm"][-1]), color = farger[dekke], fontsize=5)
991         #plt.plot(plotteGrenser[dekke]["m"][-1], plotteGrenser[dekke]["mm"][-1], "x", color=farger[dekke])
992         plt.vlines(plotteGrenser[dekke]["m"][-1], plotteGrenser[dekke]["mm"][-1], (plotteGrenser[dekke]["m"][-1]*4) +2, color =farger[dekke])
993         #plt.plot(plotteGrenser[dekke]["miang"], plotteGrenser[dekke]["mmiang"], color = farger[dekke])
994         #print(plotteGrenser[9]["m"], plotteGrenser[9]["mm"])
995     def mm(m):
996         return m*(1000/250)
997     m = np.linspace(0, 25, 100)
998
999
1000     plt.plot(m, mm(m), color='r', linestyle='--', label = "Grense")
1001     plt.plot(plotteGrenser[dekke]["m"][-1], plotteGrenser[dekke]["mm"][-1], "x", color=farger[dekke])
1002     #plt.text(plotteGrenser[dekke]["m"][-1] -0.7, plotteGrenser[dekke]["ovre"][-1] - 1, "HD" + str(Dekker[dekke]["hoyde"]))
1003     #plt.ylabel("CO2-utslipp ved produksjon [kg-CO2-ekv]")
1004     #plt.title("CO2-utslipp avhengig av t0 ved t0 = " + str(t0))
1005     #plt.xlabel("Lengde på hulldekke [meter]")
1006     #plt.ylabel("Nedboyning [mm]")
1007     #plt.xlabel("Lengde på hulldekke [m]")
1008     #plt.title("Nedboyning avhengig av dekkelengde ved t0 = " + str(t0))
1009     #plt.hlines(3, 0, 33, color = "black", label = "Grense")
1010     x = [0, 2, 7, 10, 12, 15, 18, 20, 22, 24]
1011     plt.xticks(np.arange(min(x), max(x)+1, 2))
1012
1013     plt.grid()
1014     plt.xlim(4,24)
1015
1016     plt.ylim(0,95)
1017     plt.legend(loc="lower right", fontsize=6)
1018     plt.show()
1019     """
1020     """
1021     farger = ["red", "green", "blue", "black", "magenta", "orange", "limegreen", "cyan", "saddlebrown", "pink"]
1022
1023     #PLOTTE SPENNING MOT L
1024     for dekke in range(0,10):

```

```

1025     plt.plot(plotteGrenser[dekke]["m"], plotteGrenser[dekke]["vibrasjon"], color = farger[dekke])
1026
1027
1028 #plt.plot(lengde, overforing_max, color="red", label="Grense")
1029
1030
1031     #plt.text(plotteGrenser[dekke]["m"][-1] - 0.7, plotteGrenser[dekke]["ovre"][-1] - 1, "HD" + str(Dekker[dekke]["hoyde"]))
1032     plt.xlabel("Lengde på hulldekke [meter]")
1033     plt.ylabel("f1 [Hz]")
1034     plt.title("Frekvens avhengig av dekkelengde ved t0 = " + str(t0) + " 50mm påstop")
1035     plt.hlines(3, 0, 33, color = "red", label = "Grense")
1036     plt.grid()
1037     plt.xlim(0,25)
1038     plt.ylim(0,15)
1039     plt.legend(loc="upper right")
1040     plt.show()
1041
1042     """
1043     """
1044
1045
1046     plt.figure(dpi=1200)
1047     farger = ["red", "green", "blue", "black", "red", "green", "blue", "black", "red", "green"]
1048     farger = ["red", "green", "blue", "black", "magenta", "orange", "limegreen", "cyan", "saddlebrown", "pink"]
1049
1050     for dekke in range(0,10):
1051         if dekke >= 0 and dekke<5:
1052             ny_liste = []
1053             ny_liste2 = []
1054             for num in range(len(plotteGrenser[dekke]["REI"])):
1055                 ny_liste.append(plotteGrenser[dekke]["REI"][num] - (5-dekke))
1056             for num in range(len(plotteGrenser[dekke]["REI_"])):
1057                 ny_liste2.append(plotteGrenser[dekke]["REI_"][num] - (5-dekke))
1058
1059             if plotteGrenser[dekke]["REI"] != []:
1060                 plt.plot(plotteGrenser[dekke]["m_"], ny_liste2, color = farger[dekke], ls="--")
1061                 plt.plot(plotteGrenser[dekke]["m"], ny_liste, color = farger[dekke], linestyle = "-", label= str(Dekker[dekke]["hoyde"]) + " - REI" + str(plotteGrenser[dekk
1062
1063             if dekke >= 5 and dekke<10:
1064                 ny_liste = []
1065                 ny_liste2 = []
1066                 for num in range(len(plotteGrenser[dekke]["REI"])):
1067                     ny_liste.append(plotteGrenser[dekke]["REI"][num] + (-4+dekke))
1068                 for num in range(len(plotteGrenser[dekke]["REI_"])):
1069                     ny_liste2.append(plotteGrenser[dekke]["REI_"][num] + (-4+dekke))
1070
1071                 if plotteGrenser[dekke]["REI"] != []:
1072                     plt.plot(plotteGrenser[dekke]["m_"], ny_liste2, color = farger[dekke], ls="--")
1073                     plt.plot(plotteGrenser[dekke]["m"], ny_liste, color = farger[dekke], linestyle = "-", label= str(Dekker[dekke]["hoyde"]) + " - REI" + str(plotteGrenser[dekk
1074
1075     plt.xlabel("Lengde på hulldekke [meter]")
1076     plt.ylabel("REI [minutter]")
1077     plt.title("REI avhengig av lengde ved t0 = " + str(t0))
1078     #plt.hlines(-19, 0, 33, color = "red", label = "Grense")
1079     plt.grid()
1080     plt.xlim(5,25)
1081     plt.ylim(0,150)
1082     plt.yticks(np.arange(0, 150, 30))
1083     plt.xticks(np.arange(5, 25, 5))
1084     plt.legend(loc="lower right", fontsize = 7)
1085     plt.show()
1086
1087     """
1088     """
1089
1090     farger = ["red", "green", "blue", "black", "magenta", "orange", "limegreen", "cyan", "saddlebrown", "pink"]
1091
1092     #PLOTTE SPENNING MOT L
1093     for dekke in range(0,10):
1094         plt.plot(plotteGrenser[dekke]["m"], plotteGrenser[dekke]["nedre"], color = "black")
1095         plt.plot(plotteGrenser[dekke]["m"], plotteGrenser[dekke]["ovre"], color = "black", linestyle = "--")
1096
1097     #plt.plot(lengde, overforing_max, color="red", label="Grense")
1098
1099
1100     #plt.text(plotteGrenser[dekke]["m"][-1] - 0.7, plotteGrenser[dekke]["ovre"][-1] - 1, "HD" + str(Dekker[dekke]["hoyde"]))
1101     plt.xlabel("Lengde på hulldekke [meter]")
1102     plt.ylabel("Spennning [MPa]")
1103     plt.title("Spennning i tverrsnitt ved overforing ved t0 = " + str(t0))
1104     plt.hlines(-19, 0, 33, color = "red", label = "Grense")
1105     plt.grid()
1106     plt.xlim(5,20)
1107     plt.ylim(-20,0)
1108     plt.legend(loc="upper right")
1109     plt.show()
1110
1111     """
1112     """
1113     #PLOTTE LÅSETAP MOT L
1114     plt.plot(plotteGrenser[0]["m"], plotteGrenser[0]["låsetap"], color = "black")
1115     plt.plot(plotteGrenser[1]["m"], plotteGrenser[1]["låsetap"], color = "black")
1116     plt.plot(plotteGrenser[2]["m"], plotteGrenser[2]["låsetap"], color = "black")
1117     plt.plot(plotteGrenser[3]["m"], plotteGrenser[3]["låsetap"], color = "black")
1118     plt.plot(plotteGrenser[4]["m"], plotteGrenser[4]["låsetap"], color = "black")
1119     plt.plot(plotteGrenser[5]["m"], plotteGrenser[5]["låsetap"], color = "black")
1120     plt.plot(plotteGrenser[6]["m"], plotteGrenser[6]["låsetap"], color = "black")
1121     plt.plot(plotteGrenser[7]["m"], plotteGrenser[7]["låsetap"], color = "black")
1122     plt.plot(plotteGrenser[8]["m"], plotteGrenser[8]["låsetap"], color = "black")
1123     plt.plot(plotteGrenser[9]["m"], plotteGrenser[9]["låsetap"], color = "black")
1124     plt.xlabel("Lengde på hulldekke [meter]")
1125     plt.ylabel("Tap pga Låsetap [%]")
1126     plt.title("Låsetap avhengig av lengde på hulldekke ved t0 = " + str(t0))
1127     plt.grid()
1128
1129     #Regresjonslinje
1130     def model_f(x,a,b,c):
1131         return a*(x-b)**2+c
1132     popt, pcov = curve_fit(model_f, xx, yy_låsetap)
1133
1134     a_opt, b_opt, c_opt = popt
1135     x_model = np.linspace(min(xx), max(xx), 100)
1136     y_model = model_f(x_model, a_opt, b_opt, c_opt)
1137
1138     #plt.scatter(xx, yy)
1139     plt.plot(x_model, y_model, color='r', linestyle = "--", label = "Trendlinje")
1140     plt.legend(loc="upper right")
1141     plt.ylim(0, 15)
1142     plt.show()
1143
1144     """
1145     """
1146     #PLOTTE RELAK MOT L
1147     plt.plot(plotteGrenser[0]["m"], plotteGrenser[0]["relak"], color = "black")
1148     plt.plot(plotteGrenser[1]["m"], plotteGrenser[1]["relak"], color = "black")
1149     plt.plot(plotteGrenser[2]["m"], plotteGrenser[2]["relak"], color = "black")
1150     plt.plot(plotteGrenser[3]["m"], plotteGrenser[3]["relak"], color = "black")
1151     plt.plot(plotteGrenser[4]["m"], plotteGrenser[4]["relak"], color = "black")
1152     plt.plot(plotteGrenser[5]["m"], plotteGrenser[5]["relak"], color = "black")
1153     plt.plot(plotteGrenser[6]["m"], plotteGrenser[6]["relak"], color = "black")

```

```

1153 plt.plot(plotteGrenser[7]["m"], plotteGrenser[7]["relak"], color = "black")
1154 plt.plot(plotteGrenser[8]["m"], plotteGrenser[8]["relak"], color = "black")
1155 plt.plot(plotteGrenser[9]["m"], plotteGrenser[9]["relak"], color = "black")
1156 plt.xlabel("Lengde på hulldekke [meter]")
1157 plt.ylabel("Tap pga relaksasjon[§]")
1158 plt.title('Tap pga relaksasjon avhengig av lengde på hulldekke ved t0 = ' + str(t0))
1159 plt.grid()
1160
1161 #Regresjonslinje
1162 def model_f(x,a,b,c):
1163     return a*(x-b)**2+c
1164 popt, pcov = curve_fit(model_f, xx, yy_relak)
1165
1166 a_opt, b_opt, c_opt = popt
1167 x_model = np.linspace(min(xx), max(xx), 100)
1168 y_model = model_f(x_model, a_opt, b_opt, c_opt)
1169
1170 #plt.scatter(xx, yy)
1171 plt.plot(x_model, y_model, color='r', linestyle = "--", label = "Trendlinje")
1172 plt.legend(loc='upper left')
1173 plt.ylim(0,10)
1174 #plt.xlim(4,21)
1175
1176 plt.show()
1177 """
1178 """
1179 #PLOTTE KRYP MOT L
1180 plt.plot(plotteGrenser[0]["m"], plotteGrenser[0]["kryp"], color = "black")
1181 plt.plot(plotteGrenser[1]["m"], plotteGrenser[1]["kryp"], color = "black")
1182 plt.plot(plotteGrenser[2]["m"], plotteGrenser[2]["kryp"], color = "black")
1183 plt.plot(plotteGrenser[3]["m"], plotteGrenser[3]["kryp"], color = "black")
1184 plt.plot(plotteGrenser[4]["m"], plotteGrenser[4]["kryp"], color = "black")
1185 plt.plot(plotteGrenser[5]["m"], plotteGrenser[5]["kryp"], color = "black")
1186 plt.plot(plotteGrenser[6]["m"], plotteGrenser[6]["kryp"], color = "black")
1187 plt.plot(plotteGrenser[7]["m"], plotteGrenser[7]["kryp"], color = "black")
1188 plt.plot(plotteGrenser[8]["m"], plotteGrenser[8]["kryp"], color = "black")
1189 plt.plot(plotteGrenser[9]["m"], plotteGrenser[9]["kryp"], color = "black")
1190 plt.xlabel("Lengde på hulldekke [meter]")
1191 plt.ylabel("Tap pga kryp[§]")
1192 plt.title('Tap pga kryp avhengig av lengde på hulldekke ved t0 = ' + str(t0) + " og Ap lik Asmin")
1193 plt.grid()
1194
1195 #Regresjonslinje
1196 def model_f(x,a,b,c):
1197     return a*(x-b)**2+c
1198 popt, pcov = curve_fit(model_f, xx, yy_kryp, maxfev=100000)
1199
1200 a_opt, b_opt, c_opt = popt
1201 x_model = np.linspace(min(xx), max(xx), 100)
1202 y_model = model_f(x_model, a_opt, b_opt, c_opt)
1203
1204 #plt.scatter(xx, yy)
1205 plt.plot(x_model, y_model, color='r', linestyle = "--", label = "Trendlinje")
1206 plt.legend(loc='upper left')
1207 plt.ylim(0,10)
1208 #plt.xlim(4,21)
1209
1210 plt.show()
1211 """
1212 """
1213 #PLOTTE ARMERING MOT L
1214 plt.plot(plotteGrenser[0]["m"], plotteGrenser[0]["armering"], color = "r")
1215 plt.plot(plotteGrenser[1]["m"], plotteGrenser[1]["armering"], color = "r")
1216 plt.plot(plotteGrenser[2]["m"], plotteGrenser[2]["armering"], color = "r")
1217 plt.plot(plotteGrenser[3]["m"], plotteGrenser[3]["armering"], color = "r")
1218 plt.plot(plotteGrenser[4]["m"], plotteGrenser[4]["armering"], color = "r")
1219 plt.plot(plotteGrenser[5]["m"], plotteGrenser[5]["armering"], color = "r")
1220 plt.plot(plotteGrenser[6]["m"], plotteGrenser[6]["armering"], color = "r")
1221 plt.plot(plotteGrenser[7]["m"], plotteGrenser[7]["armering"], color = "r")
1222 plt.plot(plotteGrenser[8]["m"], plotteGrenser[8]["armering"], color = "r")
1223 plt.plot(plotteGrenser[9]["m"], plotteGrenser[9]["armering"], color = "r")
1224
1225
1226 plt.plot(plotteGrenser[0]["m"], plotteGrenser[0]["Ap"], color = "black")
1227 plt.plot(plotteGrenser[1]["m"], plotteGrenser[1]["Ap"], color = "black")
1228 plt.plot(plotteGrenser[2]["m"], plotteGrenser[2]["Ap"], color = "black")
1229 plt.plot(plotteGrenser[3]["m"], plotteGrenser[3]["Ap"], color = "black")
1230 plt.plot(plotteGrenser[4]["m"], plotteGrenser[4]["Ap"], color = "black")
1231 plt.plot(plotteGrenser[5]["m"], plotteGrenser[5]["Ap"], color = "black")
1232 plt.plot(plotteGrenser[6]["m"], plotteGrenser[6]["Ap"], color = "black")
1233 plt.plot(plotteGrenser[7]["m"], plotteGrenser[7]["Ap"], color = "black")
1234 plt.plot(plotteGrenser[8]["m"], plotteGrenser[8]["Ap"], color = "black")
1235 plt.plot(plotteGrenser[9]["m"], plotteGrenser[9]["Ap"], color = "black")
1236
1237
1238 plt.xlabel("Lengde på hulldekke [meter]")
1239 plt.ylabel("As_min [mm2]")
1240 plt.title('Minimum armeringsareal avhengig av lengde på hulldekke ved t0 = ' + str(t0))
1241 plt.grid()
1242 """
1243 """
1244
1245 """
1246 #PLOTTE SVINNTAP MOT L
1247 plt.plot(plotteGrenser[0]["m"], plotteGrenser[0]["svinntap"], color="black")
1248 plt.plot(plotteGrenser[1]["m"], plotteGrenser[1]["svinntap"], color="black")
1249 plt.plot(plotteGrenser[2]["m"], plotteGrenser[2]["svinntap"], color="black")
1250 plt.plot(plotteGrenser[3]["m"], plotteGrenser[3]["svinntap"], color="black")
1251 plt.plot(plotteGrenser[4]["m"], plotteGrenser[4]["svinntap"], color="black")
1252 plt.plot(plotteGrenser[5]["m"], plotteGrenser[5]["svinntap"], color="black")
1253 plt.plot(plotteGrenser[6]["m"], plotteGrenser[6]["svinntap"], color="black")
1254 plt.plot(plotteGrenser[7]["m"], plotteGrenser[7]["svinntap"], color="black")
1255 plt.plot(plotteGrenser[8]["m"], plotteGrenser[8]["svinntap"], color="black")
1256 plt.plot(plotteGrenser[9]["m"], plotteGrenser[9]["svinntap"], color="black")
1257 plt.xlabel("Lengde på hulldekke [meter]")
1258 plt.ylabel("Svinntap[§]")
1259 plt.title('Svinntap avhengig av lengde på hulldekke ved t0 = ' + str(t0) + " og Ap lik Asmin")
1260 plt.grid()
1261 #Regresjonslinje
1262 def model_f(x,a,b,c):
1263     return a*(x-b)**2+c
1264 popt, pcov = curve_fit(model_f, xx, yy_svinntap, maxfev=100000)
1265
1266 a_opt, b_opt, c_opt = popt
1267 x_model = np.linspace(min(xx), max(xx), 100)
1268 y_model = model_f(x_model, a_opt, b_opt, c_opt)
1269
1270 #plt.scatter(xx, yy)
1271 plt.plot(x_model, y_model, color='r', linestyle = "--", label = "Trendlinje")
1272 plt.legend(loc='upper left')
1273 plt.ylim(0,10)
1274 #plt.xlim(4,21)
1275
1276 plt.show()
1277 """
1278 """
1279
1280 #PLOTTE FRIKSLONSTAP MOT L

```

```

1281 plt.plot(plotteGrenser[0]["m"], plotteGrenser[0]["frikta"], color="black")
1282 plt.plot(plotteGrenser[1]["m"], plotteGrenser[1]["frikta"], color="black")
1283 plt.plot(plotteGrenser[2]["m"], plotteGrenser[2]["frikta"], color="black")
1284 plt.plot(plotteGrenser[3]["m"], plotteGrenser[3]["frikta"], color="black")
1285 plt.plot(plotteGrenser[4]["m"], plotteGrenser[4]["frikta"], color="black")
1286 plt.plot(plotteGrenser[5]["m"], plotteGrenser[5]["frikta"], color="black")
1287 plt.plot(plotteGrenser[6]["m"], plotteGrenser[6]["frikta"], color="black")
1288 plt.plot(plotteGrenser[7]["m"], plotteGrenser[7]["frikta"], color="black")
1289 plt.plot(plotteGrenser[8]["m"], plotteGrenser[8]["frikta"], color="black")
1290 plt.plot(plotteGrenser[9]["m"], plotteGrenser[9]["frikta"], color="black")
1291 plt.xlabel("Lengde på hulldekke [meter]")
1292 plt.ylabel("Friktsjonstap [%]")
1293 plt.title('Friktsjonstap avhengig av lengde på hulldekke ved t0 = ' + str(t0))
1294 plt.grid()
1295 #Regresjonslinje
1296 def model_f(x,a,b,c):
1297     return a*(x-b)**2+c
1298 popt, pcov = curve_fit(model_f, xx, yy_frik, maxfev=100000)
1299
1300 a_opt, b_opt, c_opt = popt
1301 x_model = np.linspace(min(xx), max(xx), 100)
1302 y_model = model_f(x_model, a_opt, b_opt, c_opt)
1303
1304 #plt.scatter(xx, yy)
1305 plt.plot(x_model, y_model, color='r', linestyle = "--", label = "Trendlinje")
1306 plt.legend(loc='upper left')
1307 plt.ylim(0,10)
1308
1309
1310 plt.show()
1311 """
1312 """
1313 #PLOTTE P0 MOT LENGDE for en t0
1314
1315 #plt.plot(meter, total_tap_alle_dekker)
1316
1317
1318 plt.plot(plotteGrenser[0]["P0"], plotteGrenser[0]["tap"], color="black")
1319 plt.plot(plotteGrenser[1]["P0"], plotteGrenser[1]["tap"], color="black")
1320 plt.plot(plotteGrenser[2]["P0"], plotteGrenser[2]["tap"], color="black")
1321 plt.plot(plotteGrenser[3]["P0"], plotteGrenser[3]["tap"], color="black")
1322 plt.plot(plotteGrenser[4]["P0"], plotteGrenser[4]["tap"], color="black")
1323 plt.plot(plotteGrenser[5]["P0"], plotteGrenser[5]["tap"], color="black")
1324 plt.plot(plotteGrenser[6]["P0"], plotteGrenser[6]["tap"], color="black")
1325 plt.plot(plotteGrenser[7]["P0"], plotteGrenser[7]["tap"], color="black")
1326 plt.plot(plotteGrenser[8]["P0"], plotteGrenser[8]["tap"], color="black")
1327 plt.plot(plotteGrenser[9]["P0"], plotteGrenser[9]["tap"], color="black")
1328 plt.xlabel("Forspeningskraft P0 [kN]")
1329 plt.ylabel("Totalt tap i forspenning [%]")
1330 leg = plt.legend(loc='upper left')
1331 plt.title('Totalt tap i forspenning avhengig av P0 ved t0 = ' + str(t0) + " og Ap = As_min")
1332
1333 plt.grid()
1334
1335 """
1336 """
1337 #PLOTTE TAP MOT LENGDE for en t0
1338
1339 #plt.plot(meter, total_tap_alle_dekker)
1340 """
1341 """
1342 for tall in range(0,10):
1343     if plotteGrenser[tall]["tap"] != []:
1344         plt.plot(plotteGrenser[tall]["m"], plotteGrenser[tall]["tap"], color = "black")
1345         #plt.text(plotteGrenser[tall]["m"][-1] + 0.3, plotteGrenser[tall]["tap"][-1] - 0.035, "HD" + str(Dekker[tall]["hoyde"]))
1346
1347
1348 plt.xlabel("Lengde på hulldekke [meter]")
1349 plt.ylabel("Totalt tap i forspenning [%]")
1350
1351 plt.title('Totalt tap i forspenning avhengig av dekkelengde ved t0 = ' + str(t0))
1352 #Regresjonslinje
1353 def model_f(x,a,b,c):
1354     return a*(x-b)**2+c
1355 popt, pcov = curve_fit(model_f, xx, yy, maxfev = 100000)
1356
1357 a_opt, b_opt, c_opt = popt
1358 x_model = np.linspace(min(xx), max(xx), 100)
1359 y_model = model_f(x_model, a_opt, b_opt, c_opt)
1360
1361 #plt.scatter(xx, yy)
1362 plt.plot(x_model, y_model, color='r', linestyle = "--", label = "Trendlinje")
1363
1364 plt.title("hmm")
1365 plt.ylabel("Tap")
1366 plt.xlabel("Lengde")
1367 plt.legend(loc='upper right')
1368 plt.ylim(0, 100)
1369 plt.grid()
1370 plt.show()
1371 """
1372 """
1373 #PLOTTE BESTE DEKKE
1374
1375 #plt.plot(lengde, nedboyninger, label = "Nedboyning [mm]", color="black")
1376 plt.plot(plotteGrenser[0]["m"], plotteGrenser[0]["mm"], color="black")
1377 plt.plot(plotteGrenser[1]["m"], plotteGrenser[1]["mm"], color="black")
1378 plt.plot(plotteGrenser[2]["m"], plotteGrenser[2]["mm"], color="black")
1379 plt.plot(plotteGrenser[3]["m"], plotteGrenser[3]["mm"], color="black")
1380 plt.plot(plotteGrenser[4]["m"], plotteGrenser[4]["mm"], color="black")
1381 plt.plot(plotteGrenser[5]["m"], plotteGrenser[5]["mm"], color="black")
1382 plt.plot(plotteGrenser[6]["m"], plotteGrenser[6]["mm"], color="black")
1383 plt.plot(plotteGrenser[7]["m"], plotteGrenser[7]["mm"], color="black")
1384 plt.plot(plotteGrenser[8]["m"], plotteGrenser[8]["mm"], color="black")
1385 plt.plot(plotteGrenser[9]["m"], plotteGrenser[9]["mm"], color="black")
1386
1387
1388
1389 plt.axhline(y=0, color='black', linestyle='--')
1390
1391 def mm(m):
1392     return m*(1000/250)
1393 m = np.linspace(0, 25, 100)
1394
1395
1396 #plt.plot(lengde, grense, color='r', linestyle='--')
1397 plt.plot(m, mm(m), color='r', label = "Nedboyningskrav", linestyle='--')
1398 plt.xlabel("Lengde på hulldekke [meter]")
1399 plt.ylabel("Nedboyning [mm]")
1400 leg = plt.legend(loc='upper left')
1401 plt.title('Langtidsnedboyning avhengig av dekkelengde ved t0 = ' + str(t0))
1402 plt.xlim(0, 25)
1403 plt.ylim(-20,100)
1404 plt.grid()
1405 """
1406 """
1407 #print(matrise)
1408 print(matrise520)
1409 return matrise, matrise520

```

```

1409
1410 def forste():
1411     t0 = 3
1412     matrise200_plot = besteDekke(t0)[1]
1413     matrisen_temp = []
1414
1415     #for t0 in range(3,29):
1416     #     print(str(100*(t0/28)) + "%")
1417     #     print("Finner data for t0: " + str(t0))
1418     matrise = besteDekke(t0)[0]
1419     matrisen_temp.append(matrise)
1420
1421     #####
1422
1423     matrisen = []
1424     #try:
1425     #     x420 = [matrise420_plot["lengder"][-1], matrise420_plot["lengder"][-1]]
1426     #     y420 = [163.17742177285788, 119.94360364182425]
1427
1428
1429     #     plt.plot(x420, y420, linestyle = "dotted", color = "black")
1430     #     plt.plot(matrise420_plot["lengder"], matrise420_plot["co2"], color = matrise420_plot["farge"])
1431     #     plt.text(matrise420_plot["lengder"][-1] + 0.2, matrise420_plot["co2"][-1]-2, "HD420", fontsize = 6)
1432
1433     # except:
1434     #     print("hd420 funker ikke her")
1435
1436     for lengde in range(50,250):
1437         lengde = lengde/10
1438         temp = {"meter": 0, "co2": 0, "dekke": 0, "t0": 0, "farge": ""}
1439         farger = ["red", "green", "blue", "black", "magenta", "orange", "limegreen", "cyan", "saddlebrown", "pink"]
1440         dekke = 0
1441         co2 = 1000
1442         m = 0
1443         t0 = 0
1444         hdfarge = 0
1445         hdfarge_ = 0
1446
1447
1448
1449
1450     for t0 in range(len(matrisen_temp)):
1451         for hd in range(0,10):
1452
1453             if matrisen_temp[t0][hd]["lengder"] != []:
1454
1455                 for verdier in range(len(matrisen_temp[t0][hd]["lengder"])):
1456                     #print(verdier, hd, t0)
1457                     #print(matrisen_temp[t0][hd]["lengder"])
1458                     #print(matrisen_temp[t0][hd]["co2"])
1459
1460                     if matrisen_temp[t0][hd]["lengder"][verdier] == lengde and matrisen_temp[t0][hd]["co2"][verdier] < co2:
1461                         co2 = matrisen_temp[t0][hd]["co2"][verdier]
1462                         m = matrisen_temp[t0][hd]["lengder"][verdier]
1463                         dekke = matrisen_temp[t0][hd]["dekke"]
1464                         t0 = matrisen_temp[t0][hd]["t0"]
1465                         hdfarge = matrisen_temp[t0][hd]["farge"]
1466                         hdfarge_ = hd
1467                         #plt.plot(matrisen_temp[t0][hd]["lengder"][verdier], matrisen_temp[t0][hd]["co2"][verdier], "_", markersize = 1,color = farger[hd] )
1468
1469                     if m != 0:
1470                         temp["meter"] = m
1471                         temp["co2"] = co2
1472                         temp["t0"] = t0_
1473                         temp["dekke"] = dekke
1474                         temp["farge"] = hdfarge_
1475                         matrisen.append(temp)
1476
1477
1478
1479
1480     print(matrisen)
1481     farger = ["red", "green", "blue", "black", "magenta", "orange", "limegreen", "cyan", "saddlebrown", "pink"]
1482     forste = 0
1483     siste = 0
1484     for meter in range(len(matrisen)):
1485         farge = matrisen[meter]["farge"]
1486         #plt.plot(matrisen[meter]["meter"], matrisen[meter]["co2"], "o", markersize = 10,color = farger[farge] )
1487         if meter == len(matrisen)-1:
1488             plt.text(matrisen[meter]["meter"] + 0.2,matrisen[meter]["co2"]-2, "t0 3", fontsize=6)
1489
1490
1491
1492
1493         sistefarge = matrisen[meter-1]["farge"]
1494         co2 = matrisen[meter]["co2"]
1495         co2_forrige = matrisen[meter-1]["co2"]
1496         try:
1497             co2_neste = matrisen[meter+1]["co2"]
1498         except IndexError:
1499             co2_neste = co2
1500         m = matrisen[meter]["meter"]
1501
1502         if co2 > co2_forrige:
1503             forste = meter
1504
1505         if co2_neste > co2 or meter == len(matrisen) - 1:
1506             siste = meter
1507             xx = [matrisen[forste]["meter"], matrisen[siste]["meter"]]
1508             yy = [matrisen[forste]["co2"], matrisen[siste]["co2"]]
1509             plt.plot(xx,yy, color = farger[farge], ls="--", dashes=(2, 1))
1510
1511         if matrisen[meter]["co2"] != matrisen[meter-1]["co2"] and meter != 0:
1512             x = [matrisen[meter-1]["meter"], matrisen[meter]["meter"]]
1513             y = [matrisen[meter-1]["co2"], matrisen[meter]["co2"]]
1514             plt.plot(x,y, color = farger[sistefarge], ls="--", dashes=(2, 1))
1515
1516
1517     plt.figure(dpi=1200)
1518     gs = gridspec.GridSpec(1, 2, width_ratios=[3, 1])
1519     plt.subplot(gs[0])
1520     plt.grid()
1521     forste()
1522     plt.xticks(np.arange(5, 27, 5))
1523     plt.yticks(np.arange(0, 350, 50))
1524     plt.ylim(0,350)
1525     plt.xlim(5,27)
1526     plt.xlabel("Lengde på hulldekke [meter]")
1527     plt.ylabel("CO2-utslipp ved produksjon [kg-CO2-ekv]")
1528     #plt.vlines(21, 0, 350, color = "red", ls = "--", label = "f1 < 3.0 Hz")
1529     plt.title("CO2-utslipp avhengig av L")
1530     #plt.legend(loc = "center right", fontsize = 7.5)
1531
1532     plt.subplot(gs[1])
1533     Dekker = ["HD200", "HD220", "HD265", "HD285", "HD320", "HD340", "HD400", "HD420", "HD500", "HD520"]
1534     farger = ["red", "green", "blue", "black", "magenta", "orange", "limegreen", "cyan", "saddlebrown", "pink"]
1535     for dekke in range(0,10):
1536         strek = [1,1]

```

```
1537     hoyde = [(20.1-dekke*2), (21.3-dekke*2)]
1538
1539     plt.plot(strek, hoyde, color=farger[dekke])
1540     plt.text(4, (20.8-dekke*2), str(Dekker[dekke]), fontsize = 6)
1541
1542     plt.axis("off")
1543     plt.xlim(0,50)
1544     plt.ylim(0,21.5)
1545     plt.tight_layout()
1546     plt.show()
1547
1548     #besteDekke(3)
1549     print("Koden brukte %s sekunder" % (time.time() - start_time))
```


Vedlegg 5 - Resultater/Datasett Fra Python

| HD200 | | HD220 | | HD265 | | HD285 | | HD320 | | HD340 | |
|--------|--------------|--------|--------------|--------|--------------|--------|--------------|--------|--------------|--------|--------------|
| Lengde | CO2 | Lengde | CO2 | Lengde | CO2 | Lengde | CO2 | Lengde | CO2 | Lengde | CO2 |
| [m] | [kg-CO2-ekv] | [m] | [kg-CO2-ekv] | [m] | [kg-CO2-ekv] | [m] | [kg-CO2-ekv] | [m] | [kg-CO2-ekv] | [m] | [kg-CO2-ekv] |
| 5 | 38.40143086 | 5 | 42.51024847 | 5 | 43.73590089 | 5 | 47.83188586 | 5 | 46.277558 | 5 | 50.03837394 |
| 5.1 | 38.40143086 | 5.1 | 42.51024847 | 5.1 | 43.73590089 | 5.1 | 47.83188586 | 5.1 | 46.277558 | 5.1 | 50.03837394 |
| 5.2 | 38.40143086 | 5.2 | 42.51024847 | 5.2 | 43.73590089 | 5.2 | 47.83188586 | 5.2 | 46.277558 | 5.2 | 50.03837394 |
| 5.3 | 38.40143086 | 5.3 | 42.51024847 | 5.3 | 43.73590089 | 5.3 | 47.83188586 | 5.3 | 46.277558 | 5.3 | 50.03837394 |
| 5.4 | 38.40143086 | 5.4 | 42.51024847 | 5.4 | 43.73590089 | 5.4 | 47.83188586 | 5.4 | 46.277558 | 5.4 | 50.03837394 |
| 5.5 | 38.40143086 | 5.5 | 42.51024847 | 5.5 | 43.73590089 | 5.5 | 47.83188586 | 5.5 | 46.277558 | 5.5 | 50.03837394 |
| 5.6 | 38.40143086 | 5.6 | 42.51024847 | 5.6 | 43.73590089 | 5.6 | 47.83188586 | 5.6 | 46.277558 | 5.6 | 50.03837394 |
| 5.7 | 38.40143086 | 5.7 | 42.51024847 | 5.7 | 43.73590089 | 5.7 | 47.83188586 | 5.7 | 46.277558 | 5.7 | 50.03837394 |
| 5.8 | 38.40143086 | 5.8 | 42.51024847 | 5.8 | 43.73590089 | 5.8 | 47.83188586 | 5.8 | 46.277558 | 5.8 | 50.03837394 |
| 5.9 | 38.40143086 | 5.9 | 42.51024847 | 5.9 | 43.73590089 | 5.9 | 47.83188586 | 5.9 | 46.277558 | 5.9 | 50.03837394 |
| 6 | 38.40143086 | 6 | 42.51024847 | 6 | 43.73590089 | 6 | 47.83188586 | 6 | 46.277558 | 6 | 50.03837394 |
| 6.1 | 38.40143086 | 6.1 | 42.51024847 | 6.1 | 43.73590089 | 6.1 | 47.83188586 | 6.1 | 46.277558 | 6.1 | 50.03837394 |
| 6.2 | 38.40143086 | 6.2 | 42.51024847 | 6.2 | 43.73590089 | 6.2 | 47.83188586 | 6.2 | 46.277558 | 6.2 | 50.03837394 |
| 6.3 | 38.40143086 | 6.3 | 42.51024847 | 6.3 | 43.73590089 | 6.3 | 47.83188586 | 6.3 | 46.277558 | 6.3 | 50.03837394 |
| 6.4 | 38.40143086 | 6.4 | 42.51024847 | 6.4 | 43.73590089 | 6.4 | 47.83188586 | 6.4 | 46.277558 | 6.4 | 50.03837394 |
| 6.5 | 38.40143086 | 6.5 | 42.51024847 | 6.5 | 43.73590089 | 6.5 | 47.83188586 | 6.5 | 46.277558 | 6.5 | 50.03837394 |
| 6.6 | 38.40143086 | 6.6 | 42.51024847 | 6.6 | 43.73590089 | 6.6 | 47.83188586 | 6.6 | 46.277558 | 6.6 | 50.03837394 |
| 6.7 | 38.40143086 | 6.7 | 42.51024847 | 6.7 | 43.73590089 | 6.7 | 47.83188586 | 6.7 | 46.277558 | 6.7 | 50.03837394 |
| 6.8 | 38.40143086 | 6.8 | 42.51024847 | 6.8 | 43.73590089 | 6.8 | 47.83188586 | 6.8 | 46.277558 | 6.8 | 50.03837394 |
| 6.9 | 38.40143086 | 6.9 | 42.51024847 | 6.9 | 43.73590089 | 6.9 | 47.83188586 | 6.9 | 46.277558 | 6.9 | 50.03837394 |
| 7 | 38.40143086 | 7 | 42.51024847 | 7 | 43.73590089 | 7 | 47.83188586 | 7 | 46.277558 | 7 | 50.03837394 |
| 7.1 | 49.50818481 | 7.1 | 42.51024847 | 7.1 | 43.73590089 | 7.1 | 47.83188586 | 7.1 | 46.277558 | 7.1 | 50.03837394 |
| 7.2 | 49.50818481 | 7.2 | 42.51024847 | 7.2 | 43.73590089 | 7.2 | 47.83188586 | 7.2 | 46.277558 | 7.2 | 50.03837394 |
| 7.3 | 49.50818481 | 7.3 | 42.51024847 | 7.3 | 43.73590089 | 7.3 | 47.83188586 | 7.3 | 46.277558 | 7.3 | 50.03837394 |
| 7.4 | 49.50818481 | 7.4 | 42.51024847 | 7.4 | 43.73590089 | 7.4 | 47.83188586 | 7.4 | 46.277558 | 7.4 | 50.03837394 |
| 7.5 | 49.50818481 | 7.5 | 42.51024847 | 7.5 | 43.73590089 | 7.5 | 47.83188586 | 7.5 | 46.277558 | 7.5 | 50.03837394 |
| 7.6 | 52.42179087 | 7.6 | 42.51024847 | 7.6 | 43.73590089 | 7.6 | 47.83188586 | 7.6 | 46.277558 | 7.6 | 50.03837394 |
| 7.7 | 54.43721762 | 7.7 | 53.61700241 | 7.7 | 43.73590089 | 7.7 | 47.83188586 | 7.7 | 46.277558 | 7.7 | 50.03837394 |

| HD200 | |
|------------|------------------|
| Lengde [m] | CO2 [kg-CO2-ekv] |
| 7.9 | 59.73136398 |
| 8 | 64.72855133 |
| 8.1 | 77.80448431 |
| 8.2 | 77.80448431 |

| HD220 | |
|------------|------------------|
| Lengde [m] | CO2 [kg-CO2-ekv] |
| 7.9 | 53.61700241 |
| 8 | 53.61700241 |
| 8.1 | 56.53060848 |
| 8.2 | 56.53060848 |
| 8.3 | 63.84018159 |
| 8.4 | 63.84018159 |
| 8.5 | 63.84018159 |
| 8.6 | 68.83736893 |
| 8.7 | 81.91330192 |
| 8.8 | 81.91330192 |
| 8.9 | 81.91330192 |
| 9 | 81.91330192 |
| 9.1 | 81.91330192 |
| 9.2 | 81.91330192 |

| HD265 | |
|------------|------------------|
| Lengde [m] | CO2 [kg-CO2-ekv] |
| 7.9 | 43.73590089 |
| 8 | 43.73590089 |
| 8.1 | 43.73590089 |
| 8.2 | 43.73590089 |
| 8.3 | 43.73590089 |
| 8.4 | 43.73590089 |
| 8.5 | 43.73590089 |
| 8.6 | 43.73590089 |
| 8.7 | 43.73590089 |
| 8.8 | 43.73590089 |
| 8.9 | 53.2559757 |
| 9 | 53.2559757 |
| 9.1 | 53.2559757 |
| 9.2 | 53.2559757 |
| 9.3 | 53.2559757 |
| 9.4 | 55.75335233 |
| 9.5 | 57.48086097 |
| 9.6 | 62.01870071 |
| 9.7 | 62.01870071 |
| 9.8 | 66.30200415 |
| 9.9 | 66.30200415 |
| 10 | 77.50994671 |
| 10.1 | 77.50994671 |
| 10.2 | 77.50994671 |
| 10.3 | 77.50994671 |
| 10.4 | 77.50994671 |
| 10.5 | 77.50994671 |

| HD285 | |
|------------|------------------|
| Lengde [m] | CO2 [kg-CO2-ekv] |
| 7.9 | 47.83188586 |
| 8 | 47.83188586 |
| 8.1 | 47.83188586 |
| 8.2 | 47.83188586 |
| 8.3 | 47.83188586 |
| 8.4 | 47.83188586 |
| 8.5 | 47.83188586 |
| 8.6 | 47.83188586 |
| 8.7 | 47.83188586 |
| 8.8 | 47.83188586 |
| 8.9 | 47.83188586 |
| 9 | 47.83188586 |
| 9.1 | 47.83188586 |
| 9.2 | 47.83188586 |
| 9.3 | 57.35196067 |
| 9.4 | 57.35196067 |
| 9.5 | 57.35196067 |
| 9.6 | 57.35196067 |
| 9.7 | 57.35196067 |
| 9.8 | 57.35196067 |
| 9.9 | 59.8493373 |
| 10 | 61.57684594 |
| 10.1 | 66.11468568 |
| 10.2 | 66.11468568 |
| 10.3 | 70.39798912 |
| 10.4 | 70.39798912 |
| 10.5 | 81.60593167 |

| HD320 | |
|------------|------------------|
| Lengde [m] | CO2 [kg-CO2-ekv] |
| 7.9 | 46.277558 |
| 8 | 46.277558 |
| 8.1 | 46.277558 |
| 8.2 | 46.277558 |
| 8.3 | 46.277558 |
| 8.4 | 46.277558 |
| 8.5 | 46.277558 |
| 8.6 | 46.277558 |
| 8.7 | 46.277558 |
| 8.8 | 46.277558 |
| 8.9 | 46.277558 |
| 9 | 46.277558 |
| 9.1 | 46.277558 |
| 9.2 | 46.277558 |
| 9.3 | 46.277558 |
| 9.4 | 46.277558 |
| 9.5 | 46.277558 |
| 9.6 | 46.277558 |
| 9.7 | 46.277558 |
| 9.8 | 46.277558 |
| 9.9 | 55.79763281 |
| 10 | 55.79763281 |
| 10.1 | 55.79763281 |
| 10.2 | 55.79763281 |
| 10.3 | 55.79763281 |
| 10.4 | 55.79763281 |
| 10.5 | 55.79763281 |

| HD340 | |
|------------|------------------|
| Lengde [m] | CO2 [kg-CO2-ekv] |
| 7.9 | 50.03837394 |
| 8 | 50.03837394 |
| 8.1 | 50.03837394 |
| 8.2 | 50.03837394 |
| 8.3 | 50.03837394 |
| 8.4 | 50.03837394 |
| 8.5 | 50.03837394 |
| 8.6 | 50.03837394 |
| 8.7 | 50.03837394 |
| 8.8 | 50.03837394 |
| 8.9 | 50.03837394 |
| 9 | 50.03837394 |
| 9.1 | 50.03837394 |
| 9.2 | 50.03837394 |
| 9.3 | 50.03837394 |
| 9.4 | 50.03837394 |
| 9.5 | 50.03837394 |
| 9.6 | 50.03837394 |
| 9.7 | 50.03837394 |
| 9.8 | 50.03837394 |
| 9.9 | 50.03837394 |
| 10 | 50.03837394 |
| 10.1 | 59.55844876 |
| 10.2 | 59.55844876 |
| 10.3 | 59.55844876 |
| 10.4 | 59.55844876 |
| 10.5 | 59.55844876 |

| HD265 | |
|---------------|---------------------|
| Lengde [m] | CO2 [kg-CO2-ekv] |
| 10.7 | 88.51551204 |
| 10.8 | 88.51551204 |
| 10.9 | 88.51551204 |
| 11 | 88.51551204 |
| 11.1 | 94.34272417 |
| 11.2 | 98.37357768 |

| HD285 | |
|---------------|---------------------|
| Lengde [m] | CO2 [kg-CO2-ekv] |
| 10.7 | 81.60593167 |
| 10.8 | 81.60593167 |
| 10.9 | 81.60593167 |
| 11 | 92.61149701 |
| 11.1 | 92.61149701 |
| 11.2 | 92.61149701 |
| 11.3 | 92.61149701 |
| 11.4 | 98.43870914 |
| 11.5 | 98.43870914 |
| 11.6 | 102.4695626 |
| 11.7 | 102.4695626 |
| 11.8 | 106.6422888 |
| 11.9 | 106.6422888 |
| 12 | 106.6422888 |

| HD320 | |
|---------------|---------------------|
| Lengde [m] | CO2 [kg-CO2-ekv] |
| 10.7 | 58.29500944 |
| 10.8 | 58.29500944 |
| 10.9 | 64.56035782 |
| 11 | 64.56035782 |
| 11.1 | 64.56035782 |
| 11.2 | 68.84366126 |
| 11.3 | 68.84366126 |
| 11.4 | 80.05160381 |
| 11.5 | 80.05160381 |
| 11.6 | 80.05160381 |
| 11.7 | 80.05160381 |
| 11.8 | 80.05160381 |
| 11.9 | 80.05160381 |
| 12 | 91.05716915 |
| 12.1 | 91.05716915 |
| 12.2 | 91.05716915 |
| 12.3 | 91.05716915 |
| 12.4 | 91.05716915 |
| 12.5 | 96.88438128 |
| 12.6 | 96.88438128 |
| 12.7 | 100.9152348 |
| 12.8 | 100.9152348 |
| 12.9 | 105.087961 |

| HD340 | |
|---------------|---------------------|
| Lengde [m] | CO2 [kg-CO2-ekv] |
| 10.7 | 59.55844876 |
| 10.8 | 59.55844876 |
| 10.9 | 59.55844876 |
| 11 | 59.55844876 |
| 11.1 | 62.05582538 |
| 11.2 | 62.05582538 |
| 11.3 | 63.78333403 |
| 11.4 | 68.32117376 |
| 11.5 | 68.32117376 |
| 11.6 | 72.6044772 |
| 11.7 | 72.6044772 |
| 11.8 | 83.81241976 |
| 11.9 | 83.81241976 |
| 12 | 83.81241976 |
| 12.1 | 83.81241976 |
| 12.2 | 83.81241976 |
| 12.3 | 94.8179851 |
| 12.4 | 94.8179851 |
| 12.5 | 94.8179851 |
| 12.6 | 94.8179851 |
| 12.7 | 94.8179851 |
| 12.8 | 100.6451972 |
| 12.9 | 100.6451972 |
| 13 | 104.6760507 |
| 13.1 | 104.6760507 |
| 13.2 | 108.8487769 |
| 13.3 | 108.8487769 |

| HD340 | |
|---------------|---------------------|
| Lengde [m] | CO2 [kg-CO2-ekv] |
| 13.5 | 115.2643435 |
| 13.6 | 115.2643435 |
| 13.7 | 130.9120667 |
| 13.8 | 130.9120667 |

| HD400 | |
|---------------|---------------------|
| Lengde [m] | CO2 [kg-CO2-ekv] |
| 5 | 47.6377641 |
| 5.1 | 47.6377641 |
| 5.2 | 47.6377641 |
| 5.3 | 47.6377641 |
| 5.4 | 47.6377641 |
| 5.5 | 47.6377641 |
| 5.6 | 47.6377641 |
| 5.7 | 47.6377641 |
| 5.8 | 47.6377641 |
| 5.9 | 47.6377641 |
| 6 | 47.6377641 |
| 6.1 | 47.6377641 |
| 6.2 | 47.6377641 |
| 6.3 | 47.6377641 |
| 6.4 | 47.6377641 |
| 6.5 | 47.6377641 |
| 6.6 | 47.6377641 |
| 6.7 | 47.6377641 |
| 6.8 | 47.6377641 |
| 6.9 | 47.6377641 |
| 7 | 47.6377641 |
| 7.1 | 47.6377641 |
| 7.2 | 47.6377641 |
| 7.3 | 47.6377641 |
| 7.4 | 47.6377641 |
| 7.5 | 47.6377641 |
| 7.6 | 47.6377641 |
| 7.7 | 47.6377641 |

| HD420 | |
|---------------|---------------------|
| Lengde [m] | CO2 [kg-CO2-ekv] |
| 5 | 56.77290382 |
| 5.1 | 56.77290382 |
| 5.2 | 56.77290382 |
| 5.3 | 56.77290382 |
| 5.4 | 56.77290382 |
| 5.5 | 56.77290382 |
| 5.6 | 56.77290382 |
| 5.7 | 56.77290382 |
| 5.8 | 56.77290382 |
| 5.9 | 56.77290382 |
| 6 | 56.77290382 |
| 6.1 | 56.77290382 |
| 6.2 | 56.77290382 |
| 6.3 | 56.77290382 |
| 6.4 | 56.77290382 |
| 6.5 | 56.77290382 |
| 6.6 | 56.77290382 |
| 6.7 | 56.77290382 |
| 6.8 | 56.77290382 |
| 6.9 | 56.77290382 |
| 7 | 56.77290382 |
| 7.1 | 56.77290382 |
| 7.2 | 56.77290382 |
| 7.3 | 56.77290382 |
| 7.4 | 56.77290382 |
| 7.5 | 56.77290382 |
| 7.6 | 56.77290382 |
| 7.7 | 56.77290382 |

| HD500 | |
|---------------|---------------------|
| Lengde [m] | CO2 [kg-CO2-ekv] |
| 5 | 61.56892866 |
| 5.1 | 61.56892866 |
| 5.2 | 61.56892866 |
| 5.3 | 61.56892866 |
| 5.4 | 61.56892866 |
| 5.5 | 61.56892866 |
| 5.6 | 61.56892866 |
| 5.7 | 61.56892866 |
| 5.8 | 61.56892866 |
| 5.9 | 61.56892866 |
| 6 | 61.56892866 |
| 6.1 | 61.56892866 |
| 6.2 | 61.56892866 |
| 6.3 | 61.56892866 |
| 6.4 | 61.56892866 |
| 6.5 | 61.56892866 |
| 6.6 | 61.56892866 |
| 6.7 | 61.56892866 |
| 6.8 | 61.56892866 |
| 6.9 | 61.56892866 |
| 7 | 61.56892866 |
| 7.1 | 61.56892866 |
| 7.2 | 61.56892866 |
| 7.3 | 61.56892866 |
| 7.4 | 61.56892866 |
| 7.5 | 61.56892866 |
| 7.6 | 61.56892866 |
| 7.7 | 61.56892866 |

| HD520 | |
|---------------|---------------------|
| Lengde [m] | CO2 [kg-CO2-ekv] |
| 5 | 65.30592685 |
| 5.1 | 65.30592685 |
| 5.2 | 65.30592685 |
| 5.3 | 65.30592685 |
| 5.4 | 65.30592685 |
| 5.5 | 65.30592685 |
| 5.6 | 65.30592685 |
| 5.7 | 65.30592685 |
| 5.8 | 65.30592685 |
| 5.9 | 65.30592685 |
| 6 | 65.30592685 |
| 6.1 | 65.30592685 |
| 6.2 | 65.30592685 |
| 6.3 | 65.30592685 |
| 6.4 | 65.30592685 |
| 6.5 | 65.30592685 |
| 6.6 | 65.30592685 |
| 6.7 | 65.30592685 |
| 6.8 | 65.30592685 |
| 6.9 | 65.30592685 |
| 7 | 65.30592685 |
| 7.1 | 65.30592685 |
| 7.2 | 65.30592685 |
| 7.3 | 65.30592685 |
| 7.4 | 65.30592685 |
| 7.5 | 65.30592685 |
| 7.6 | 65.30592685 |
| 7.7 | 65.30592685 |

| HD400 | |
|---------------|---------------------|
| Lengde [m] | CO2 [kg-CO2-ekv] |
| 7.9 | 47.6377641 |
| 8 | 47.6377641 |
| 8.1 | 47.6377641 |
| 8.2 | 47.6377641 |
| 8.3 | 47.6377641 |
| 8.4 | 47.6377641 |
| 8.5 | 47.6377641 |
| 8.6 | 47.6377641 |
| 8.7 | 47.6377641 |
| 8.8 | 47.6377641 |
| 8.9 | 47.6377641 |
| 9 | 47.6377641 |
| 9.1 | 47.6377641 |
| 9.2 | 47.6377641 |
| 9.3 | 47.6377641 |
| 9.4 | 47.6377641 |
| 9.5 | 47.6377641 |
| 9.6 | 47.6377641 |
| 9.7 | 47.6377641 |
| 9.8 | 47.6377641 |
| 9.9 | 47.6377641 |
| 10 | 47.6377641 |
| 10.1 | 47.6377641 |
| 10.2 | 47.6377641 |
| 10.3 | 55.57115978 |
| 10.4 | 55.57115978 |
| 10.5 | 55.57115978 |

| HD420 | |
|---------------|---------------------|
| Lengde [m] | CO2 [kg-CO2-ekv] |
| 7.9 | 56.77290382 |
| 8 | 56.77290382 |
| 8.1 | 56.77290382 |
| 8.2 | 56.77290382 |
| 8.3 | 56.77290382 |
| 8.4 | 56.77290382 |
| 8.5 | 56.77290382 |
| 8.6 | 56.77290382 |
| 8.7 | 56.77290382 |
| 8.8 | 56.77290382 |
| 8.9 | 56.77290382 |
| 9 | 56.77290382 |
| 9.1 | 56.77290382 |
| 9.2 | 56.77290382 |
| 9.3 | 56.77290382 |
| 9.4 | 56.77290382 |
| 9.5 | 56.77290382 |
| 9.6 | 56.77290382 |
| 9.7 | 56.77290382 |
| 9.8 | 56.77290382 |
| 9.9 | 56.77290382 |
| 10 | 56.77290382 |
| 10.1 | 56.77290382 |
| 10.2 | 56.77290382 |
| 10.3 | 56.77290382 |
| 10.4 | 56.77290382 |
| 10.5 | 56.77290382 |

| HD500 | |
|---------------|---------------------|
| Lengde [m] | CO2 [kg-CO2-ekv] |
| 7.9 | 61.56892866 |
| 8 | 61.56892866 |
| 8.1 | 61.56892866 |
| 8.2 | 61.56892866 |
| 8.3 | 61.56892866 |
| 8.4 | 61.56892866 |
| 8.5 | 61.56892866 |
| 8.6 | 61.56892866 |
| 8.7 | 61.56892866 |
| 8.8 | 61.56892866 |
| 8.9 | 61.56892866 |
| 9 | 61.56892866 |
| 9.1 | 61.56892866 |
| 9.2 | 61.56892866 |
| 9.3 | 61.56892866 |
| 9.4 | 61.56892866 |
| 9.5 | 61.56892866 |
| 9.6 | 61.56892866 |
| 9.7 | 61.56892866 |
| 9.8 | 61.56892866 |
| 9.9 | 61.56892866 |
| 10 | 61.56892866 |
| 10.1 | 61.56892866 |
| 10.2 | 61.56892866 |
| 10.3 | 61.56892866 |
| 10.4 | 61.56892866 |
| 10.5 | 61.56892866 |

| HD520 | |
|---------------|---------------------|
| Lengde [m] | CO2 [kg-CO2-ekv] |
| 7.9 | 65.30592685 |
| 8 | 65.30592685 |
| 8.1 | 65.30592685 |
| 8.2 | 65.30592685 |
| 8.3 | 65.30592685 |
| 8.4 | 65.30592685 |
| 8.5 | 65.30592685 |
| 8.6 | 65.30592685 |
| 8.7 | 65.30592685 |
| 8.8 | 65.30592685 |
| 8.9 | 65.30592685 |
| 9 | 65.30592685 |
| 9.1 | 65.30592685 |
| 9.2 | 65.30592685 |
| 9.3 | 65.30592685 |
| 9.4 | 65.30592685 |
| 9.5 | 65.30592685 |
| 9.6 | 65.30592685 |
| 9.7 | 65.30592685 |
| 9.8 | 65.30592685 |
| 9.9 | 65.30592685 |
| 10 | 65.30592685 |
| 10.1 | 65.30592685 |
| 10.2 | 65.30592685 |
| 10.3 | 65.30592685 |
| 10.4 | 65.30592685 |
| 10.5 | 65.30592685 |

| HD400 | |
|------------|------------------|
| Lengde [m] | CO2 [kg-CO2-ekv] |
| 10.7 | 55.57115978 |
| 10.8 | 55.57115978 |
| 10.9 | 55.57115978 |
| 11 | 55.57115978 |
| 11.1 | 55.57115978 |
| 11.2 | 55.57115978 |
| 11.3 | 55.57115978 |
| 11.4 | 55.57115978 |
| 11.5 | 55.57115978 |
| 11.6 | 55.57115978 |
| 11.7 | 55.57115978 |
| 11.8 | 55.57115978 |
| 11.9 | 57.65230697 |
| 12 | 57.65230697 |
| 12.1 | 57.65230697 |
| 12.2 | 57.65230697 |
| 12.3 | 57.65230697 |
| 12.4 | 57.65230697 |
| 12.5 | 62.87343062 |
| 12.6 | 62.87343062 |
| 12.7 | 62.87343062 |
| 12.8 | 66.44285015 |
| 12.9 | 66.44285015 |
| 13 | 75.78280228 |
| 13.1 | 75.78280228 |
| 13.2 | 75.78280228 |
| 13.3 | 75.78280228 |

| HD420 | |
|------------|------------------|
| Lengde [m] | CO2 [kg-CO2-ekv] |
| 10.7 | 56.77290382 |
| 10.8 | 64.70629949 |
| 10.9 | 64.70629949 |
| 11 | 64.70629949 |
| 11.1 | 64.70629949 |
| 11.2 | 64.70629949 |
| 11.3 | 64.70629949 |
| 11.4 | 64.70629949 |
| 11.5 | 64.70629949 |
| 11.6 | 64.70629949 |
| 11.7 | 64.70629949 |
| 11.8 | 64.70629949 |
| 11.9 | 64.70629949 |
| 12 | 64.70629949 |
| 12.1 | 64.70629949 |
| 12.2 | 64.70629949 |
| 12.3 | 66.78744668 |
| 12.4 | 66.78744668 |
| 12.5 | 66.78744668 |
| 12.6 | 66.78744668 |
| 12.7 | 66.78744668 |
| 12.8 | 66.78744668 |
| 12.9 | 72.00857033 |
| 13 | 72.00857033 |
| 13.1 | 72.00857033 |
| 13.2 | 72.00857033 |
| 13.3 | 72.00857033 |

| HD500 | |
|------------|------------------|
| Lengde [m] | CO2 [kg-CO2-ekv] |
| 10.7 | 61.56892866 |
| 10.8 | 61.56892866 |
| 10.9 | 61.56892866 |
| 11 | 61.56892866 |
| 11.1 | 61.56892866 |
| 11.2 | 61.56892866 |
| 11.3 | 69.50232434 |
| 11.4 | 69.50232434 |
| 11.5 | 69.50232434 |
| 11.6 | 69.50232434 |
| 11.7 | 69.50232434 |
| 11.8 | 69.50232434 |
| 11.9 | 69.50232434 |
| 12 | 69.50232434 |
| 12.1 | 69.50232434 |
| 12.2 | 69.50232434 |
| 12.3 | 69.50232434 |
| 12.4 | 69.50232434 |
| 12.5 | 69.50232434 |
| 12.6 | 69.50232434 |
| 12.7 | 69.50232434 |
| 12.8 | 69.50232434 |
| 12.9 | 71.58347153 |
| 13 | 71.58347153 |
| 13.1 | 71.58347153 |
| 13.2 | 71.58347153 |
| 13.3 | 71.58347153 |

| HD520 | |
|------------|------------------|
| Lengde [m] | CO2 [kg-CO2-ekv] |
| 10.7 | 65.30592685 |
| 10.8 | 65.30592685 |
| 10.9 | 65.30592685 |
| 11 | 65.30592685 |
| 11.1 | 65.30592685 |
| 11.2 | 65.30592685 |
| 11.3 | 65.30592685 |
| 11.4 | 65.30592685 |
| 11.5 | 65.30592685 |
| 11.6 | 65.30592685 |
| 11.7 | 65.30592685 |
| 11.8 | 65.30592685 |
| 11.9 | 65.30592685 |
| 12 | 65.30592685 |
| 12.1 | 65.30592685 |
| 12.2 | 74.82600167 |
| 12.3 | 74.82600167 |
| 12.4 | 74.82600167 |
| 12.5 | 74.82600167 |
| 12.6 | 74.82600167 |
| 12.7 | 74.82600167 |
| 12.8 | 74.82600167 |
| 12.9 | 74.82600167 |
| 13 | 74.82600167 |
| 13.1 | 74.82600167 |
| 13.2 | 74.82600167 |
| 13.3 | 74.82600167 |

| HD400 | |
|------------|------------------|
| Lengde [m] | CO2 [kg-CO2-ekv] |
| 13.5 | 75.78280228 |
| 13.6 | 84.95410673 |
| 13.7 | 84.95410673 |
| 13.8 | 84.95410673 |
| 13.9 | 84.95410673 |
| 14 | 84.95410673 |
| 14.1 | 89.81011684 |
| 14.2 | 89.81011684 |
| 14.3 | 89.81011684 |
| 14.4 | 93.16916143 |
| 14.5 | 96.64643325 |
| 14.6 | 96.64643325 |
| 14.7 | 96.64643325 |
| 14.8 | 101.9927387 |
| 14.9 | 101.9927387 |
| 15 | 115.032508 |
| 15.1 | 115.032508 |
| 15.2 | 115.032508 |
| 15.3 | 115.032508 |
| 15.4 | 115.032508 |
| 15.5 | 115.032508 |
| 15.6 | 115.032508 |

| HD420 | |
|------------|------------------|
| Lengde [m] | CO2 [kg-CO2-ekv] |
| 13.5 | 72.00857033 |
| 13.6 | 75.57798987 |
| 13.7 | 84.917942 |
| 13.8 | 84.917942 |
| 13.9 | 84.917942 |
| 14 | 84.917942 |
| 14.1 | 84.917942 |
| 14.2 | 84.917942 |
| 14.3 | 94.08924645 |
| 14.4 | 94.08924645 |
| 14.5 | 94.08924645 |
| 14.6 | 94.08924645 |
| 14.7 | 98.94525655 |
| 14.8 | 98.94525655 |
| 14.9 | 102.3043011 |
| 15 | 102.3043011 |
| 15.1 | 105.781573 |
| 15.2 | 105.781573 |
| 15.3 | 111.1278784 |
| 15.4 | 111.1278784 |
| 15.5 | 124.1676478 |
| 15.6 | 124.1676478 |
| 15.7 | 124.1676478 |
| 15.8 | 124.1676478 |
| 15.9 | 124.1676478 |
| 16 | 124.1676478 |
| 16.1 | 124.1676478 |

| HD500 | |
|------------|------------------|
| Lengde [m] | CO2 [kg-CO2-ekv] |
| 13.5 | 76.80459518 |
| 13.6 | 76.80459518 |
| 13.7 | 76.80459518 |
| 13.8 | 76.80459518 |
| 13.9 | 76.80459518 |
| 14 | 76.80459518 |
| 14.1 | 76.80459518 |
| 14.2 | 76.80459518 |
| 14.3 | 80.37401471 |
| 14.4 | 80.37401471 |
| 14.5 | 80.37401471 |
| 14.6 | 80.37401471 |
| 14.7 | 80.37401471 |
| 14.8 | 89.71396684 |
| 14.9 | 89.71396684 |
| 15 | 89.71396684 |
| 15.1 | 89.71396684 |
| 15.2 | 89.71396684 |
| 15.3 | 89.71396684 |
| 15.4 | 89.71396684 |
| 15.5 | 89.71396684 |
| 15.6 | 98.88527129 |
| 15.7 | 98.88527129 |
| 15.8 | 98.88527129 |
| 15.9 | 98.88527129 |
| 16 | 103.7412814 |
| 16.1 | 103.7412814 |

| HD520 | |
|------------|------------------|
| Lengde [m] | CO2 [kg-CO2-ekv] |
| 13.5 | 74.82600167 |
| 13.6 | 74.82600167 |
| 13.7 | 74.82600167 |
| 13.8 | 74.82600167 |
| 13.9 | 77.32337829 |
| 14 | 77.32337829 |
| 14.1 | 77.32337829 |
| 14.2 | 77.32337829 |
| 14.3 | 77.32337829 |
| 14.4 | 77.32337829 |
| 14.5 | 79.05088694 |
| 14.6 | 79.05088694 |
| 14.7 | 83.58872667 |
| 14.8 | 83.58872667 |
| 14.9 | 83.58872667 |
| 15 | 83.58872667 |
| 15.1 | 83.58872667 |
| 15.2 | 83.58872667 |
| 15.3 | 83.58872667 |
| 15.4 | 83.58872667 |
| 15.5 | 87.87203011 |
| 15.6 | 87.87203011 |
| 15.7 | 87.87203011 |
| 15.8 | 99.07997267 |
| 15.9 | 99.07997267 |
| 16 | 99.07997267 |
| 16.1 | 99.07997267 |

| HD420 | |
|---------------|---------------------|
| Lengde [m] | CO2 [kg-CO2-ekv] |
| 16.3 | 130.8179301 |
| 16.4 | 130.8179301 |
| 16.5 | 141.2497456 |
| 16.6 | 141.2497456 |
| 16.7 | 163.1774218 |
| 16.8 | 163.1774218 |
| 16.9 | 163.1774218 |
| 17 | 163.1774218 |
| 17.1 | 163.1774218 |
| 17.2 | 163.1774218 |
| 17.3 | 163.1774218 |
| 17.4 | 163.1774218 |
| 17.5 | 163.1774218 |

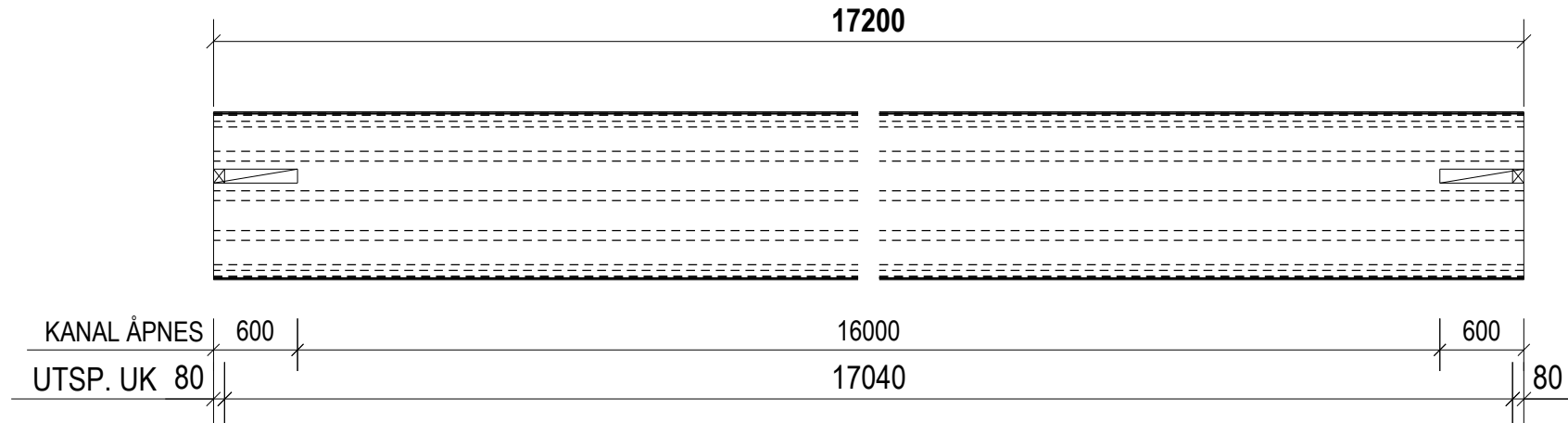
| HD500 | |
|---------------|---------------------|
| Lengde [m] | CO2 [kg-CO2-ekv] |
| 16.3 | 107.100326 |
| 16.4 | 110.5775978 |
| 16.5 | 110.5775978 |
| 16.6 | 115.9239032 |
| 16.7 | 115.9239032 |
| 16.8 | 128.9636726 |
| 16.9 | 128.9636726 |
| 17 | 128.9636726 |
| 17.1 | 128.9636726 |
| 17.2 | 128.9636726 |
| 17.3 | 128.9636726 |
| 17.4 | 128.9636726 |
| 17.5 | 128.9636726 |
| 17.6 | 135.613955 |
| 17.7 | 135.613955 |
| 17.8 | 146.0457705 |
| 17.9 | 146.0457705 |
| 18 | 146.0457705 |
| 18.1 | 167.9734466 |
| 18.2 | 167.9734466 |
| 18.3 | 167.9734466 |
| 18.4 | 167.9734466 |
| 18.5 | 167.9734466 |
| 18.6 | 167.9734466 |
| 18.7 | 167.9734466 |
| 18.8 | 167.9734466 |
| 18.9 | 167.9734466 |

| HD520 | |
|---------------|---------------------|
| Lengde [m] | CO2 [kg-CO2-ekv] |
| 16.3 | 110.085538 |
| 16.4 | 110.085538 |
| 16.5 | 110.085538 |
| 16.6 | 110.085538 |
| 16.7 | 110.085538 |
| 16.8 | 110.085538 |
| 16.9 | 115.9127501 |
| 17 | 115.9127501 |
| 17.1 | 119.9436036 |
| 17.2 | 119.9436036 |
| 17.3 | 124.1163298 |
| 17.4 | 124.1163298 |
| 17.5 | 124.1163298 |
| 17.6 | 130.5318964 |
| 17.7 | 130.5318964 |
| 17.8 | 146.1796196 |
| 17.9 | 146.1796196 |
| 18 | 146.1796196 |
| 18.1 | 146.1796196 |
| 18.2 | 146.1796196 |
| 18.3 | 146.1796196 |
| 18.4 | 146.1796196 |
| 18.5 | 146.1796196 |
| 18.6 | 146.1796196 |
| 18.7 | 154.1599584 |
| 18.8 | 154.1599584 |
| 18.9 | 154.1599584 |

| HD500 | |
|---------------|---------------------|
| Lengde [m] | CO2 [kg-CO2-ekv] |
| 19.1 | 167.9734466 |
| 19.2 | 167.9734466 |
| 19.3 | 167.9734466 |
| 19.4 | 180.9923523 |
| 19.5 | 180.9923523 |
| 19.6 | 180.9923523 |

| HD520 | |
|---------------|---------------------|
| Lengde [m] | CO2 [kg-CO2-ekv] |
| 19.1 | 166.678137 |
| 19.2 | 166.678137 |
| 19.3 | 192.9913484 |
| 19.4 | 192.9913484 |
| 19.5 | 192.9913484 |
| 19.6 | 192.9913484 |
| 19.7 | 192.9913484 |
| 19.8 | 192.9913484 |
| 19.9 | 192.9913484 |
| 20 | 192.9913484 |
| 20.1 | 192.9913484 |
| 20.2 | 192.9913484 |
| 20.3 | 192.9913484 |

Vedlegg 6 - HD5069 – 1 – HD420 Loe Betong As



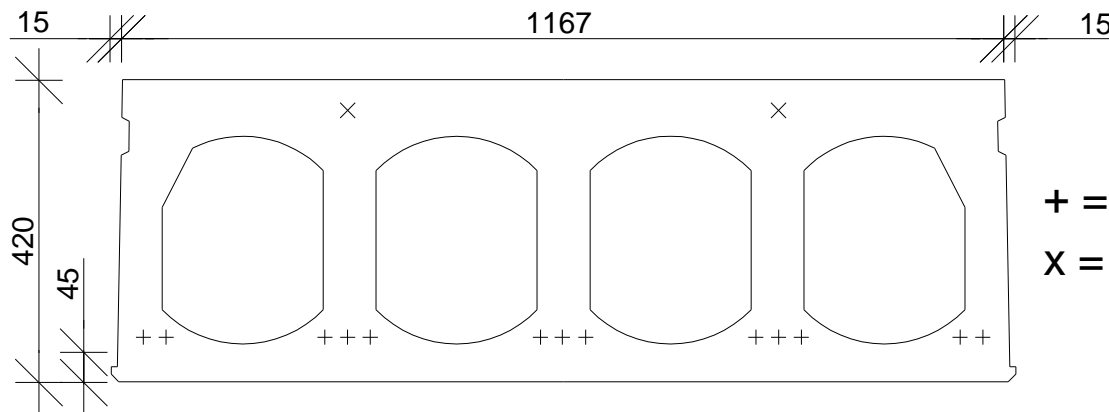
HD5069

Antall: **480**

Vekt: **10.9** t

Lengde: **17200** mm

Bredde: **1170** mm



+ = 12.9 mm w
x = 9.6 mm w

| MERKE | FORANDRING | DATO | TEGN |
|---------------|--------------------|----------------------|------|
| Fornebuporten | Arkiv nr 13-011 | Tegn 23.10.2013 | AK |
| HD420 | Rev.mrk | Godkj. 24.10.2013 | AK |

| | | | | | |
|-----|----|------|----------------------|-----|------|
| UK: | 13 | stk. | 12.9 mm w oppsp. | 115 | kN/w |
| | | | stk. 9.6 mm w oppsp. | | kN/w |
| OK: | 2 | stk. | 9.6 mm w oppsp. | 45 | kN/w |

| | | | |
|---------------|--------|------------------|-----------------|
| Clorid kl.: | 0,1 | Eksporeringskl.: | XC1 |
| Dmax: | 16 | Spennarmering: | Y1860 S7 |
| Toleransekl.: | NORMAL | | |
| Brannkl.: | R90 | 28 | Betong: B45 M45 |

Loe Betongelementer AS
PÅ LAG MED BRUKERNE

P.B 4 3301 HOKKSUND tlf 32274000
www.loe.no firmapost@loe.no

Vedlegg 7 - Dimensjonering for jordskjelv

Dimensjonering for jordskjelv

EC8 inkluderer 4 utelatelseskriterier for jordskjelvdimensjonering (CEN, 2021). Hvis området oppfyller minst et av kravene, trengs det ikke nærmere vurdering av bygget. Hvis områdesemisiteten oppfyller kravene nedenfor, kan nærmere vurdering utelates:

$$a_g < 0.04 \cdot g = 0.39 \frac{m}{s^2} \quad \text{og} \quad a_g \cdot S < 0.05 \cdot g = 0.49 \frac{m}{s^2}$$

Der g er tyngdeakselerasjonen = 9.81 m/s^2 , S er grunnforholdenes forsterkningsfaktor, satt her = 1.25 og a_g er dimensjonerende grunnakselerasjon lik:

$$a_g = \gamma_1 \cdot a_{gR}$$

Der $\gamma_1 = 1.0$ og a_{gR} er referansespissverdi for berggrunnens akselerasjon:

$$a_{gR} = 0.8 \cdot a_{g40Hz}$$

Der a_{g40Hz} er spissverdi for berggrunnens spektralakselerasjon ved 40Hz, for jordskjelv med returperiode på 475 år gitt etter område (Statens Vegvesen, 2017).

Tabell NA.3.2 (902) — Spissverdier for berggrunnens akselerasjon a_{gR} (PGA) med en returperiode på 475 år for Oslo

| Kommune | Nr. | a_{gR} [m/s ²] |
|---------|-----|---------------------------------|
| Oslo | 301 | 0,30 |

Tabell 1: Tabell NA.3.2 (902) (CEN, 2021)

(5)P I tilfeller med svært lav seismisitet er det ikke nødvendig å overholde bestemmelsene i NS-EN 1998.

MERKNAD Konstruksjonskategoriene, grunntypene og de seismiske sonene som det ikke er nødvendig å overholde bestemmelsene i NS-EN 1998 for (tilfeller med svært lav seismisitet), kan angis i det nasjonale tillegget til dette dokumentet. Det anbefales å anse tilfeller med svært lav seismisitet som de tilfeller der den dimensjonerende grunnakselerasjonen på grunntype A, a_g , ikke er større enn $0,04 \text{ g}$ ($0,39 \text{ m/s}^2$), eller de tilfeller der produktet $a_g \cdot S$ ikke er større enn $0,05 \text{ g}$ ($0,49 \text{ m/s}^2$). Beslutningen om hvorvidt verdien av a_g eller verdien av produktet $a_g \cdot S$ skal brukes i et land for å definere terskelverdien for tilfeller med svært lav seismisitet, kan angis i det nasjonale tillegget til dette dokumentet.

Figur 1: Eurokode 8-1 3.2.1(5) (CEN, 2021)

Settes denne verdien inn i likningene:

$$a_g \cdot S < 0.05 \cdot g = 0.49 \frac{m}{s^2}$$

$$0.3 \cdot 1.25 < 0.49 \frac{m}{s^2}$$

$$0.375 < 0.49 \frac{m}{s^2}$$

...og:

$$a_g = 0.375 < 0.04 \cdot g = 0.39 \frac{m}{s^2}$$

...er lav seismisitet påvist og nærmere vurdering av bygget kan utelates.