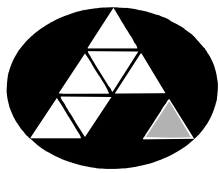


POHJOIS-KARJALAN AMMATTIKORKEAKOULU
Rakennustekniikan koulutusohjelma

Lauri Muona

TUNNELILOUHINNAN AIKAINEN SUOJASEINÄ

Opinnäytetyö
Toukokuu 2012



POHJOIS-KARJALAN
AMMATIKORKEAKOULU

OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2012
Rakennustekniikan koulutusohjelma

Karjalankatu 3
80200 JOENSUU

Tekijä(t)

Lauri Muona

Nimeke

Tunnelilouhinnan aikainen suojaseinä

Tiivistelmä

Tässä työssä tarkasteltiin tunnelilouhinnan aikana ilmeneviä kuormituksia ja rasituksia, jotka kohdistuivat betonirakenteisiin. Betonirakenteen rakenteellinen mitoitus tehtiin koko Euroopan kattavalla Eurokoodi 2 suunnitteluohjeella. Kalliotekniseen suunnitteluun ei varsinaisesti ole olemassa mitään tiettyjä normeja ja laillisia määräyksiä, joten suunnitteluun jää itse harkittavaksi, mitkä kuormitustapaukset kussakin kalliorakennuskohteessa on otettava huomioon ja miten kuormitukset rakennetta pahiten rasittavat. Tämän takia suunnittelun vaatimustaso kasvaa huomattavasti ja yksinkertaisten rakenteiden tuotanto vaatii yleensä uudelleen suunnittelua.

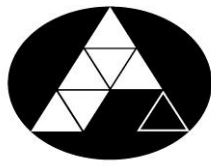
Opinnäytetyön tarkoituksena oli suunnitella ja mitoittaa tunnelilouhinta työmaalle väliaikainen suoja- ja paineseinä nykyisellä Eurokoodi 2:n laskentametodilla, joka vastaa tämän päivän vaatimuksia rakennesuunnittelulle. Työn tarkoituksena oli tuoda esille uusi prototyypirakenne tämän päivän rakennustuotantoon, ja kehittää siitä paras mahdollinen tuote. Kyseisen prototyypin perusmalli oli käytössä jo aiemmin, mutta tässä opinnäytetyössä rakenteen jatkokehittely onnistui tuomaan prototyypille uusia ominaisuuksia ja laskennallisia määrityksiä. Prototyypin uuteen perusmalliin lisättiin läpimenevä kulku- ja liikenneyhteys sekä ilmanvaihtokanavia. Aikaisempaa prototyyppiä oli käytetty ainoastaan suojaseinänä ja tämä uusi prototyyppi oli lujuusominaisuuksiltaan kestävämpi ja kustannuksiltaan lähes samanhintainen kuin edeltäjänsä.

Kieli
suomi

Sivuja 31 + 7
Liitteet 7
Liitesivumäärä 7

Asiasanat

Suojaseinä, tunnelilouhinta, kallioteknillinen suunnittelu,



NORTH KARELIA
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

THESIS
May 2012
Degree Programme in Civil Engineering

Karjalankatu 3
FIN 80200 JOENSUU
FINLAND

Author(s)

Lauri Muona

Title

Protection wall of tunnel excavation

Abstract

New rules and requirements for concrete constructions set design challenges that need to be resolved in today's design. This work examines stresses and strains occurring during tunnel excavation which are focused on concrete structures. The design of concrete structures was calculated by using design instructions from the Eurocode 2 guide. There are no specific standards or legal regulations for technical design in rock engineering. This is why designers have to consider themselves what load cases must be taken into account for each building and how loads burden the structure in the worst way. For this reason, the design requirements grow significantly and the production of simple structures usually requires re-engineering.

The aim of this thesis was to design and dimension a temporary pressure and protective wall at a tunnel excavation site with the current Euro Code 2's dimension mode, which corresponds to the requirements of today's structural design. The purpose of the study was to bring out a new prototype of the structure for today's building production, and develop the best possible product. The basic prototype was used in the past, but in this study the further development of the prototype succeeded in bringing new features and computational specifications. A new access and traffic line and ventilation ducts were added to this new prototype. The previous prototype had been used only as a protective wall while this new prototype was more durable according to its strength characteristics and cost almost the same as its predecessor

Language
Finnish

Pages 31 + 7
Appendices 7
Pages of Appendices 7

Keywords

protective wall, tunnel excavation, planning in rock engineering

Sisällys

Alkusanat.....	5
1 Johdanto.....	6
2 Suojaseinän käyttötarkoitus.....	8
2.1 Suojaseinän ominaisvaatimukset.....	8
2.2 Paineaalto.....	8
2.3 Tunnelin ilmavirtaus.....	9
3 Teräsovi.....	10
3.1 Teräsoven mitoitus.....	10
3.2 Toleranssit.....	10
3.3 Teräsoven ominaisuudet.....	10
4 Suojaseinän valmistustekniikka.....	12
4.1 Työtekniikan valinta.....	12
4.2 Kalliotekniset työt.....	12
4.3 Liittolevyseinä.....	13
4.4 Teräksillä vahvistettu betoni.....	13
4.5 Kuivaruiskutusmenetelmä.....	14
5 Suojaseinän suunnittelua ohjaavat normit ja mallit.....	16
5.1 Normit.....	16
5.2 Tunneliprofiilin mitoitusmalli.....	16
6 Suojaseinän laskenta ja mitoitus.....	19
6.1 Kuormat.....	19
6.2 Laatan momenttikertoimet.....	20
6.3 Teräsmäärät.....	21
6.4 Reikien mitoitus.....	23
6.5 Ovireiän mitoitus.....	23
6.6 Tuuletusreikien mitoitus.....	25
6.7 Leikkausraudoitus.....	26
6.8 Leikkausraudoitettu rakenne.....	27
6.8 Pääterästen ankkurointi.....	28
7 Tulosten analysointi.....	29
8 Pohdinta.....	30
Lähteet.....	31

Liitteet:

Liite 1	Suojaseinän mallinnuskuva
Liite 2	Suojaseinän mittakuva
Liite 3	Suojaseinän poikkileikkauskuva
Liite 4	Suojaseinän raudoituskuva
Liite 5	Suojaseinän raudoitusleikkauskuva A-A
Liite 6	Suojaseinän raudoitusleikkauskuva B-B
Liite 7	Suojaseinän raudoitusleikkauskuva C-C

Alkusanat

Syksyllä 2011 sain toimeksiannon Kalliorakennus Oy nimiseltä yritykseltä, jossa olen työskennellyt jo pari vuotta. Tehtävänäni oli suunnitella ns. sääsuojaovet Lauttasaaren työmaalle. Esitys tuli suoraan toimitusjohtajan Jukka Halosen toimesta, hän pyysi minua suunnittelemaan ja mitoittamaan kyseisen rakenteen. Rakennuttaja oli kysynyt urakoitsijalta (Kalliorakennus OY), olisiko meillä vastaavaa toimintatapaa ja suunnitelmia kyseiseen rakenteeseen. Rakenteella oli kuitenkin tiettyjä vaatimuksia, jotka piti täyttyä. Koulutukseni pohjalta mitään ongelmaa en tässä projektissa nähnyt. Tämän idean innoittamana päätin ryhtyä toimeen, sillä kyseessä oli aihe insinööri-koulutuksen lopputyöksi.

Rakennuttajan kiireellinen aikataulu muutti suunnitelmia ja omat työtkin painoivat pahasti päälle. Syksy oli jo pitkällä ja talvi tulossa. Suojaovet oli kiireimmiten saatava asennettua kohteeseen, joten suunnittelu- ja tuotantovaihe siirtyivät suoraan kevääseen. Ongelmista huolimatta projekti on jo käynnissä ja tuotanto pannaan toimeen heti, kuin tarvittavat suunnitelmat ja piirustukset rakennuttaja hyväksyy.

Lauri Muona

1 Johdanto

Rakennustyömaalla tulee päivittäin erilaisia työtekniikoita koskevia ongelmia. Ahtaat ja korkeat paikat vaikeuttavat huomattavasti työskentelyä. Tämän takia joudumme käyttämään väliaikaisia rakenteita pystyäksemme toteuttamaan urakan. YSE 08:n (yleiset sopimusehdot) mukaan urakoitsijalle kuuluu työmaapalveluiden suorittaminen. Kyseinen pykälä kattaa ja pakottaa urakoitsijan tekemään kunnostus- ja väliaikaiset rakennustyöt. Tähän kuuluu mm. työmaateiden kunnossapito, erilaiset siirtymis- ja kulkureitit ja työmaatelineet, jotka yleensä jäävät jatkourakoitsijan käyttöön, jos siihen on tarvetta.

Suomessa neljä vuodenaikaa aiheuttaa erityyppisiä olosuhteita. Kylmyys ja talvi ovat hankaloittavia tekijöitä rakennustyömaalle. Tätä varten tehtäväni oli suunnitella ja vielä toteuttaakin sääsuojaovi talven pakkasia vastaan. Tämän kaltaisia väliaikaisia ratkaisuja on paljon käytetty kaivannaisteollisuudessa, kuten nytkin tässä tapauksessa. Aivan kuin muillakin talonrakennustyömailla, ovien ja ikkunoiden paikat suojataan lumen sisään tulemisen ja lämmön karkaamisen takia. Erilaiset työvaiheet vaativat hyvät olosuhteet, jotta kyseinen työvaihe saadaan tehtyä hyvin ja laatuvaatimuksien ehdoilla.

Työmaan tehtäväsuunnittelu ja väliaikaisten rakenteiden käyttö on lisääntynyt huomattavasti. Hyvällä tehtäväsuunnittelu- ja esivalmistelutyöllä helpotamme omaa tekemistämme ja osaamme välttää työstä aiheutuvia ongelmia. Työnjohtajilla ja työmaamestareilla on tässä asiassa tärkeä tehtävä. Tällöin laatu- ja kustannustekijät sekä aikataulu kulkevat käsi kädessä. Tässä työssä jouduinkin juuri perehtymään eräänlaisiin pääkohtiin, joita ovat työn aikainen työturvallisuus, laatu- ja kustannustehokkuus.

Työn tarkoituksena on tehdä ns. prototyyppi, joka täyttää vain sille asetetut vaatimukset. Muita kriteerejä ei ollut. Seinän tarkoituksena on vain sen toimivuus tässä kyseisessä tilanteessa. Kuitenkin voidaan ottaa huomioon, että

kyseistä seinää voi jatkojalostaa ja kehittää sitä vielä tehokkaammaksi sekä parantaa sen käyttötarkoituksia vaatimuksien mukaan. Määräävänä tekijänä on kuitenkin sille asetettavat vaatimukset ja suunnittelu tapahtuu näiden kriteerien mukaan.

Koulutukseni aikana tutustuimme päivitettyihin normeihin, mitkä antavat mahdollisuuden suunnitella rakenteita ympäri Eurooppaa, koska kyseessä on kaikille samat säädökset. Kyseessä ovat teräsbetoninormit. Entiset betoninormit (By 50) on korvattu EC 2:lla (Eurokoodi 2), johon on tullut muutamia pieniä muutoksia aikaisempiin betoninormeihin nähden.

2 Suojaseinän käyttötarkoitus

2.1 Suojaseinän ominaisvaatimukset

Suojaseinä rakennetaan tunnelin suuaukolle noin 5-7 metriä suuaukosta sisäänpäin. Näin tämä kyseinen rakenne palvelisi kaikista parhaiten kaikkia vaatimuksia. Rakenteen käyttövaatimuksia on mietitty tarkoin, mitä kaikkea seinän tulisi kestää ja mitkä ominaisuudet seinän tulisi täyttää. Räjähdystöistä aiheutuvat paineaallot, tunnelissa vallitsevat ilmanpaine-erot, talvikeleistä aiheutuvat lumi- ja pakkasvaikutukset tulisi ottaa huomioon suunnittelussa. Päijänne-tunnelin työmaalla vesi pääsi yllättäen nousemaan puoleenväliin väli aikaista suojaseinää. Seinän tarkoituksena on kuitenkin päästää kulku- ja autoliikenne lävitse, joten on lähes mahdotonta tehdä tässä tapauksessa vesitiivistä rakennetta alareunasta, jotta saisimme veden nousun estettyä ulospäin.

2.2 Paineaalto

Kyseisen rakenteen tarkoituksena ei ole ainoastaan suojata kylmiltä sääolosuhteilta. Kyseessä on tunnelilouhinta-työmaa, jossa suoritetaan erilaisia louhinta- ja räjäytystöitä. Räjähdystöistä syntyvät paineaallot puskevat tunneliverkostoa pitkin poispäin räjähdyspaikasta jopa 300 kN/m²:n paineella. Suojaseinän tarkoituksena oli ottaa paineaalto vastaan ja pysäyttää se tai ainakin heikentää aallon pääsyä ulkoilmaan. Paineaallon voimakkuus on otettu huomioon teräsoven suunnittelussa, joka pienin määrin päästää paineita läpi. Suojaseinä toimii eräänlaisena suodattimena. Kyseisen teräsoven toimintamalliin ja sen ominaisuuksiin palataan myöhemmin luvussa 3.

2.3 Tunnelin ilmavirtaus

Sään muutokset ja siitä aiheutuvat ilmastolliset tekijät ovat yksi osa-alue suunnitellessa ovea. Tämäkin kyseinen asia on otettu huomioon teräsoven ominaisuuksissa. Kylmällä talvipakkaskelillä ilma virtaa tunnelin lävitse melkoisella voimalla; voidaan melkein käyttää termiä tuulitunneli. Seinässä sijaitsevassa ovesa on neljä erikokoista luukkua, joiden tarkoituksena on pienentää aukon kokoa ja samalla pienentää ilmavirtauksen määrää tunnelissa. Työolosuhteet ovat paremmat, koska kylmyys ei pääse niin kovasti vaikuttamaan. Ilmavirtaus on kuitenkin oltava pakollinen, jotta tunnelissa riittää puhdasta ja hapekasta ilmaa. Tunneliin menevien puhaltimien ansiosta (ks. liite 2) ilmaa kierrätetään tunneliin.

Luukuilla on myös toinen tehtävä. Räjähdystöistä aiheutuvat räjähdyskaasut on pakko poistaa tunneleista ennen kuin työt voidaan taas aloittaa. Puhaltimista jatketut ns. rätit puhaltavat ilmaa tunneliin perälle, jolloin kaasut pyritään ohjaamaan ulos tunnelista. Sillä hetkellä oven luukut ovat auki tai hieman raollaan, koska oven aukaiseminen vetää kaasuja ulos tunnelista ja näin tuulettuminen paranee huomattavasti.

3 Teräsovi

3.1 Teräsoven mitoitus

Opinnäytetyötä rajatessani päätin että oven mitoitus jätetään huomioimatta. Teräsovien valmistajilla on niin paljon osaamista ja tieto-taitoa teräsovien mitoituksista ja valmistuksesta, joten päätin suosiolla jättää kyseisen työn heidän harteilleen. Pääosin tässä insinööriyössä on tarkoitus laatia kuormitustapaukset ja rasitusalueet kyseiselle ovelle ja antaa tarvittavat lähtötiedot valmistajalle kyseistä mitoitusprosessia varten. Tässä tapauksessa oveen kohdistuva kuorma tulee olemaan 50 kN/m^2 , mikä ilmoitetaan tilauksen yhteydessä. Muita lähtötietoja ovat teräsoven materiaalit, jotka huomioivat ulkoilman rasitukset, kuten sateet ja maaperästä nousevat muut korroosiota aiheuttavat tekijät. Tästä johtuen teräsovi tarvitsee ns. korroosiosuojan, joka voidaan toteuttaa tehtaalla vaikka pinnoittamalla

3.2 Toleranssit

Teräsoven paikka on tarkoin määritelty suunnitelmissa ja piirustuksissa. Siksi teräsoven mitoilla on tarkat toleranssit, jonka suunnittelija määrittää ennen kuin tilaustyö laitetaan täytäntöön. Yleensä toleranssit liikkuvat 5 - 10 mm haarukassa, eli teräsoven pituus- ja leveyssuunnan mitat saavat poiketa suunnitelman mukaisista mitoista 5 - 10 mm suunnassaan.

3.3 Teräsoven ominaisuudet

Suomessa on useita erilaisia teräslevyjen valmistajia, jotka voivat tilaajan määräyksien ja tarpeiden mukaan toteuttaa kyseisiä ovimalleja. Erilaisten tehtaiden ansiosta voidaan tilaustyötä myös kilpailuttaa, jolloin saadaan ovelle halvempi kustannustaso. Teräsovessa on pienehköjä luukkuja (ks. liite nro. 10) jotka vaikeuttavat teräsoven valmistusta huomattavasti. Ylemmät luukut ovat ilmanpoistoluukkuja, joista ilma poistuu tunnelista. Ylemmät luukut ovat yleensä koko ajan auki ilmanvaihdon tehostamiseksi. Alemmat ovat niin sanottua

kulkureitin estoa varten, jotka puolestaan avataan silloin kun liikenne on välttämätöntä. Yleensä tunnelit etenevät loivasti viistossa alaspäin. Tämä vaikuttaa ovien kääntymissuuntaan tässäkin tapauksessa. Alemmat ovet kääntyvät sisään päin, jottei maanpinta estä ovien avautumista. Ovien alareunaan on asennettava ns. laahauskumit, jotka tiivistävät alareunassa olevaa rakennetta ja joustavat avauksen yhteydessä maanpinnan epätasaisuutta.

4 Suojaseinän valmistustekniikka

4.1 Työtekniikan valinta

Rakenteen toteuttamiseksi mietimme minkälaisella työtekniikalla onnistuisimme parhaiten toteuttamaan rakenteen. Kalliorakennus OY on erikoistunut louhinta- ja lujitusteknisiin palveluihin. Valintamme oli selvä. Parhaiten kyseiseen kohteeseen sopisi ruiskubetonointitekniikka. Rakentaminen ei vaatisi kuin helposti asennettavan tukiseinän takapuolelle, jota vastaan ruiskubetonointi onnistuisi ja betonille olisi hyvä tartuntapinta. Ruiskubetonointi on selvästi vaivattomin työtapana, jolla saavutamme tarvittavan puristuslujuuden seinälle. Valumenetelmällä joutuisimme ns. tuplaamaan kyseisen seinän, koska valubetoni tarvitsee aina jonkinlaisen muotin, johon massa valetaan. Kyseessä olisi siis yksi työvaihe lisää. Valutekniikkaa ajatellessa ongelmakohtaksi muodostui tunneliprofiilin yläosa. Miten saisimme valettua yläosan tiiviiksi? Tämä oli yksi syy, mikä syrjäytti valutekniikan pois työtekniikasta.

4.2 Kalliotekniset työt

Ennen varsinaisia teräs- ja betonointitöitä kalliotekniset työt ovat tehtyinä valmiiksi. Suojaseinän kohdalle kallion seiniin tulee asentaa tartuntatavat, jotka ovat harjateräspultteja. Pulttien asentaminen edellyttää kallion seiniin porattavia reikiä. Reiän syvyys tulee rakenteellisen mitoituksen mukaan. Reikiin juotetaan juotosmassalla harjaterästapit, johon betoniseinässä oleva raudoitusverkko kiinnitetään. Seinän kohdalla kallion tulee olla ehjää ja mielellään tasaista. Vaikka seinän ominaisvaatimuksissa ei olisi vesitiiviysvaatimusta, helpottaa kallion kunto itse rakennustöitä.

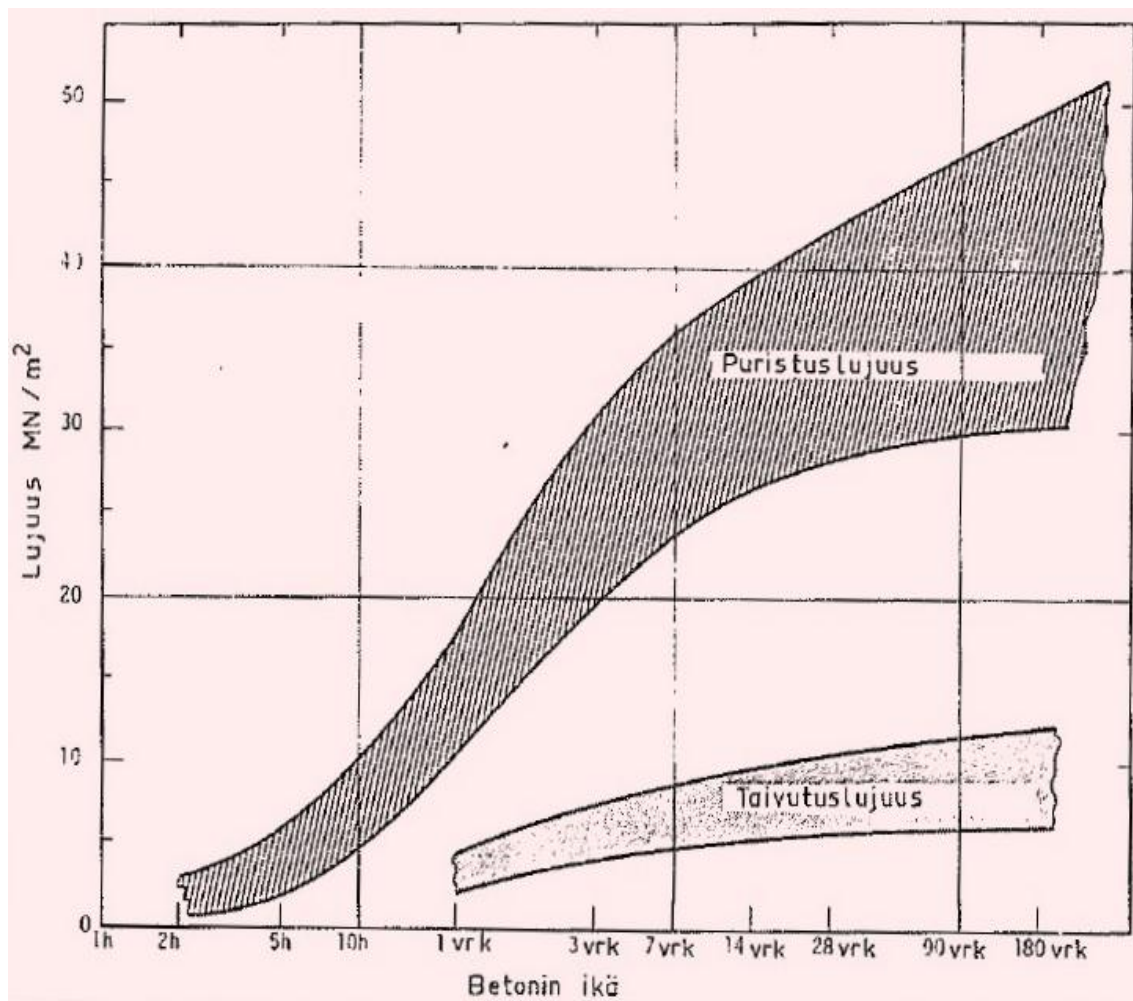
4.3 Liittolevyseinä

Omasta kokemuksesta olemme huomanneet, että ns. liittolevyseinä sopii parhaiten ominaisuuksiltaan ja työteknillisesti tukiseinäksi rappauksen taakse. Liittolevyt ovat tarpeeksi kestäviä ottamaan vastaan ruiskubetonoinnissa aiheutuvan kivien sinkoilun ja ruiskutuspaineen hajoamatta. Levyissä on eräänlainen karhennus, joten ruiskubetoni tarttuu todella hyvin kyseiseen levyyn. Levyjen työstettävyys on helppoa. Koska kallionseinissä on epätasaisuuksia, pystytään levy leikkaamaan oikean muotoiseksi. Saumat ja pienet aukot täytetään polyuretaanivaahdolla jälkeempään.

4.4 Teräksillä vahvistettu betoni

Teräksellä vahvistettua betonirakennetta käytetään kaikista eniten rakentamisteollisuudessa. Teräksellä ja betonilla on melkein samanlaiset lämpölaajenemiskertoimet. Betoni ja teräs kutistuvat ja kasvavat lähes samassa suhteessa lämpötilamuutoksen aikana. Harjaterästä käytetään melkein kaikissa rakenteissa vahvistamaan betonia. Tangon harjamaisuus antaa betonin ja teräksen väliin hyvän tartuntapinnan, joka vaikuttaa lujuuteen positiivisesti.

Ainoana ongelmakohtana on saada seinä mahdollisimman tiiviiksi betonista, koska mitoituksen jälkeen seinä vaatii pääraudoituksen ulko- sekä sisäpintaan. Tällöin betonia ruiskutettaessa voi betonin ja teräksen väliin jäädä pientä huokoisuutta, mikä heikentää rakenteen lujutta. Seinän sisään asennetaan harjateräsverkko tietyn matkan päähän syvyysuuntaan liittolevyistä, jotta betonista tuleva raudoituksen suojakerros varmistetaan. Betonipeitteen paksuus määrittää kyseisen rakenteen paloluokan. Kuvassa (1) määritellään ruiskubetonille saatuja lujuusarvoja, joita voidaan käyttää rakenteen mitoituksessa.



Kuva 1. Kuivaseosmenetelmällä tehdyn ruiskubetonin puristus- ja taivutuslujuuden tyypillisiä arvoja (Pöllä 1988, s.39)

4.5 Kuivaruiskutusmenetelmä

Kuivaruiskutusmenetelmällä valmisbetoni myllätään, ja siihen lisätään kiihdytinaine. Mylly pumpppaa kuivamassan putkistoa pitkin suuttimeen, johon vesi tulee eri putkea pitkin. Suuttimessa vesi ja kuiva-aine sekoittuvat ja paine ruiskuttaa betonimassan ruiskutettavaan kohteeseen. Betonointi tapahtuu kuivaruiskutustekniikalla, jolla saamme hieman paremman lujuusluokituksen betonille, kuin märkäseosmenetelmällä. Kuivaruiskutustekniikalla päästään jopa yli 40 Mpa:n puristuslujuuteen. Märkäseosmenetelmällä lujuus on hieman

heikompi. Varhaislujuus voidaan saavuttaa jopa muutamien tuntien päästä ruiskutuksesta, mutta tavoitelujuuden saamiseksi tarvitaan jopa vuorokausia. Ruiskubetonoinnissa käytetään erilaisia lisä- ja seosaineita, jotka vaikuttavat betonin lujuuden kehittymiseen alentavasti. Kiihdytin on yksi tarpeellinen lisäaine betonimassan joukossa, jotta betoni saadaan jämähtämään kallion seiniin.

5 Suojaseinän suunnittelua ohjaavat normit ja mallit

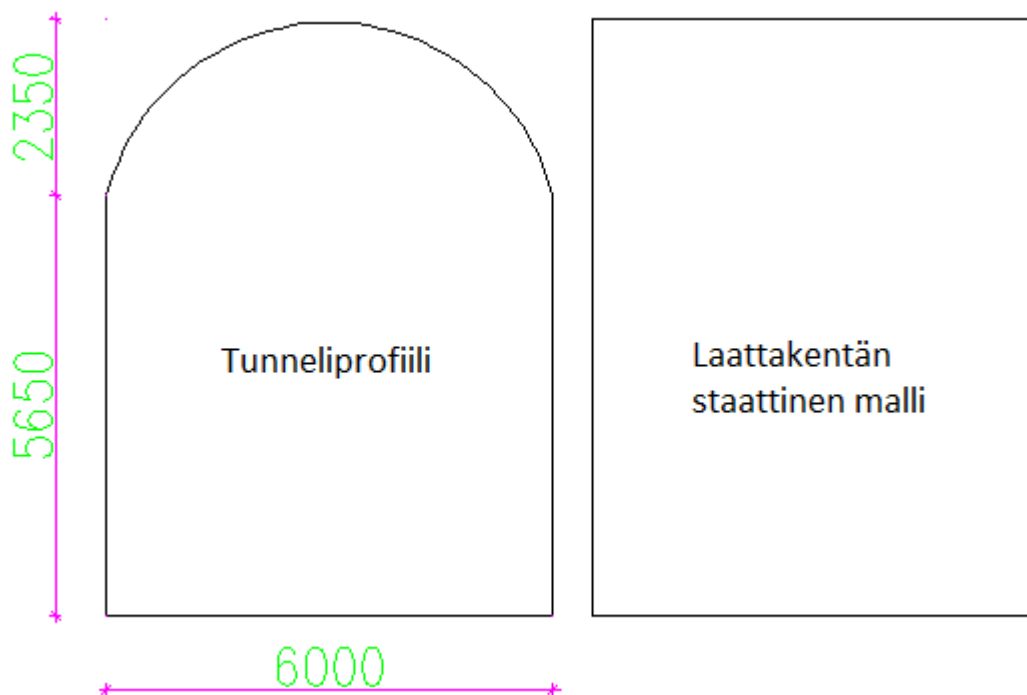
5.1 Normit

Kallioteknisessä suunnittelussa ei varsinaisesti ole mitään normeja, säännöksiä tai kuormitusnormeihin verrattavia laskentakaavoja tai ohjeita, joten suunnittelijan harteille jää päätettäväksi, mitkä asiat kyseisessä kohteessa on otettava huomioon ja mitkä kuormitustapaukset vaikuttavat kyseisiin rakenteisiin. Sisäasiainministeriö on antanut rakennusmääräyskokoelmissa normijulkaisuja, joita voidaan sisällyttää kalliorakentamisessa suunnitteluun ja mitoitukseen. Kyseisessä työssä tarvittavia teoksia ja opuksia selaillessani keräilin mitoitusteknillistä tietoa ja kokosin niistä yhteisiä paketteja.

Kirjallisuutta olivat mm. Suomen Betoniyhdistys ry:n BY 202 osat I ja I (2008), RIL 154-1 Tunneli- ja kalliorakennus osat I ja II (1987), Sisäasiainministeriön rakentamismääräyskokoelman normijulkaisut B1(1998), B2 (1990) ja B3 (2004). Kansalliset liitteet A ja B osiot. Kyseisellä julkaisulla tehdään mitoitus töitä edelleenkin. Kyseisen EC2:n sisällössä pyritään omaamaan yhteiset kaavat ympäri Eurooppaa. Kyseiset laskelmat, jotka ovat tarkoitettu Suomeen rakennettaville kohteille, pätevät myös kaikissa Euroopan maissa, koska yhteisesti sovitut määräykset ovat voimassa.

5.2 Tunneliprofiilin mitoitusmalli

Isoissa louhintaurakoissa mitoittavat tekijät tulevat nykyajan kaluston mukaan. Suuret porauslaitteet ja kivenkuormausautojen ulosajot määräävät suurta osaa tunnelitilojen suunnittelussa, jotta kyseisiä hankkeita pystytään edes toteuttamaan. Kuitenkin tunneliprofiilien suunnittelussa ja mitoituksessa on käytetty tiettyjä perinteisiä arvoja, jotka on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. Mitoituksen ajattelumalli. (Mitat ovat johdettuja RIL 154-1 Tunneli ja kalliorakennus osasta 1 (1987).)

Lähtökohtaisesti kyseisen tunneliprofiilin epätasaisuuden takia rakenne ajatellaan ns. ristiin kantavana laattarakenteena, jonka sivun mitat ajatellaan tunneliprofiilin leveytenä x ja tunneliprofiilin huippukorkeutena y . Aivan kuin kerroksen välipohjat mitoitetaan normaalissa kerrostalorakentamisessa. Tässä mallissa pohja on käännetty 90° pystysuuntaan, joten kaikki kuormitustapaukset ajatellaan pystysuunnasta vaakasuuntaan, ja päinvastoin. Näin kyseisen rakenteen laskentamalli helpottuu. Oviaukon kohta ajatellaan reikänä keskellä laattaa, joten aivan kuin normaalissa välipohjassa, isona läpivientireikänä. Laatan pääraudoitus ajatellaan laatan ulkoseinän puolelle, koska räjähdyksistä johtuva paineaalto painaa rakennetta ulospäin. Seinän ulkopuoli on siis ns.

venyvä puoli, mikä tarvitsee vetoraudoituksen. Kuitenkin kuormat tulevat niin suuriksi, että rakenteen molemmille puolille joudutaan asentamaan verkkoraudoitukset.

6 Suojaseinän laskenta ja mitoitus

6.1 Kuormat

Sisäasiainministeriön asettamat kriisiaikaiset väestönsuojan painekuormat säädetään pelastuslain (379/2011) 12 ja 74 §:n perusteella. Mitoituksen perusarvo S1-luokan rakenteessa on 100 kN/m². Suojaseinä rakennetaan kuitenkin tarpeeksi kauaksi louhittavasta kalliosta tunnelin perällä. Aikaisemmat räjäytykset tunnelilouhinnassa ovat osoittaneet, että seinään kohdistuva paineaalto heikentyy edetessään kohti suuaukkoa. Tällöin se ei aiheuta kovin isoa kuormitusta kyseiselle rakenteelle, joten käytämme arvoa 50 kN/m² (Standardin SFS-EN 1991-1-7 kohta 3.3). Taulukossa (1) määräytyy kuillekin rakenneluokille osavarmuuskertoimet, joita käytetään mitoituksessa.

Taulukko 1. Osavarmuuskertoimet (RIL 202-2011)

Mitoitustilanteet	Betonin γ_c	Betoniteräksen γ_s	Jänneteräksen γ_s
Normaalisti vallitseva tilapäinen ja	1,5	1,15	1,15
Onnettomuus	1,2	1,0	1,0

Lasketaan ominaiskuormat g_k eli paineaallosta aiheutuva ja betonin ominaispaino q_k .

$$q_k = 2,5 \text{ kN/m}^2$$

$$g_k = 50 \text{ kN/m}^2$$

$$\Rightarrow 52,5 \text{ kN/m}^2$$

Painekuormaan onnettomuustilanteessa oleva lisäkerroin $\Psi = 1$ (Standardin SFS-EN 1991-1-7 mukaan)

Laskentakuormat:

$$Pd = 1,5 * (52,5 \text{ kN/m}^2) * \Psi \quad \Rightarrow 78,75 \text{ kN/m}^2$$

Laattalaskentaan tarvittava lähtömomentti m lasketaan kaavalla 1.

$$m = a * Pd * L_x^2 \quad (1)$$

missä

a on momenttikerroin eri tuentatapauksille sivusuhteen L_y/L_x funktiona.

Pd on kuormien laskenta-arvo

L_x on sivun lyhyempi jännemitta

6.2 Laatan momenttikerroimet

Momenttikerroimet on saatu Betonisuunnittelun oppikirja osa II tuentatapaus 7 taulukosta 3.1, jossa y ja x merkinnät tarkoittavat kantosuuntaa ja f ja s kenttä- ja tukimomenttia.

$$a_{ys} = 0,0319$$

$$a_{xs} = 0,0525$$

$$a_{yf} = 0,0184$$

$$a_{xf} = 0,0332$$

$$m_{y_s} = 0,0319 * 78,75 \text{ kN/m}^2 * 6\text{m}^2 = 90,436 \text{ kNm/m}$$

$$m_{x_s} = 0,0525 * 78,75 \text{ kN/m}^2 * 6\text{m}^2 = 148,83 \text{ kNm/m}$$

$$m_{y_f} = 0,0184 * 78,75 \text{ kN/m}^2 * 6\text{m}^2 = 52,164 \text{ kNm/m}$$

$$m_{x_f} = 0,0332 * 78,75 \text{ kN/m}^2 * 6\text{m}^2 = 94,122 \text{ kNm/m}$$

6.3 Teräsmäärät

Suurehkoissa rakenteissa käytetään yleensä lujuusluokaltaan C25/30 betonia, mutta lujuuden lisäämiseksi käytetään lujuusluokkaa C30/37 rakennebetonia, johon soveltuu hyvin teräslaatu A500HW.

Valitaan betoniksi:

$$f_{ck} \text{ C30/37} \Rightarrow f_{cd} = 25\text{Mpa} \quad (\text{Eurokoodi 2 by60 s.22})$$

Teräkseksi: A500HW

$$f_{sk} \text{ 500} \Rightarrow f_{yd} = 435\text{Mpa} \quad (\text{Eurokoodi 2 by60 s.31})$$

Arvioidaan seinän paksuudeksi $d \approx 240\text{mm}$

Seuraavilla kaavoilla saadaan laskettua momenttien perusteella tuille ja kentille tarvittava teräsmäärät.

Suhteellinen momentti μ

$$\mu = \frac{Md}{f_{cd} * d^2} \quad (2)$$

Suhteellinen momentti β

$$\beta = \sqrt{(1 - 2\mu)} \quad (3)$$

Raudoituksen pinta-ala A_s

$$A_s = \frac{\beta * f_{cd}}{f_{sd}} * d \text{ (mm)} \quad (4)$$

Teräksien neliömillimetrimäärät tuille ja kentille

$$A_{ys} = 615,25 \text{ mm}^2 / \text{m}$$

$$A_{xs} = 1508,01 \text{ mm}^2 / \text{m}$$

$$A_{yf} = 509,04 \text{ mm}^2 / \text{m}$$

$$A_{xf} = 933,11 \text{ mm}^2 / \text{m}$$

Kyseisistä pinta-aloista valitaan Betonirakenteiden suunnitteluohjeesta RIL 202-2011 tarvittavat teräsyhdistelmät:

$$A_{ys} = 615,25 \text{ mm}^2 / \text{m} \quad 2 \text{ kpl } 20 \text{ mm}^2 \text{ harjaterästankoja } / \text{m}$$

$$A_{xs} = 1508,01 \text{ mm}^2 / \text{m} \quad 4 \text{ kpl } 25 \text{ mm}^2 \text{ harjaterästankoja } / \text{m}$$

$$A_{yf} = 509,04 \text{ mm}^2 / \text{m} \quad 3 \text{ kpl } 16 \text{ mm}^2 \text{ harjaterästankoja } / \text{m}$$

$$A_{xf} = 933,11 \text{ mm}^2 / \text{m} \quad 5 \text{ kpl } 16 \text{ mm}^2 \text{ harjaterästankoja } / \text{m}$$

Kenttäraudoituksessa voidaan käyttää harjateräsverkkoa 12 mm k/k 100.

Nykyisen Eurokoodi 2:n mukaan terästen väli toisiinsa nähden on joko teräksen läpimitta tai vähintään 25 mm:

$$1000 \text{ mm} - 4 * 25 \text{ mm (harjateräkset)} + \text{teräksien välit } 4 * 20 \text{ mm} + \text{suojabetoni } 35 \text{ mm} = 205 \text{ mm}$$

Teräkset mahtuvat hyvin metrin alueelle yhteen riviin.

6.4 Reikien mitoitus

Isokokoisien teräsoven takia kyseinen rakenne joudutaan ajattelemaan laattana, jonka keskellä oletetaan olevan isokokoinen reikä. Samaa ajatusmallia käytetään ympyrämuotoisia läpivientejä varten. Oveen sekä reikien kohdalle kohdistuvat momenttikuormat on pakko siirtää kantavalle rakenteelle eli reikien reunoille.

6.5 Ovireiän mitoitus

Suuaukko on todella iso suhteessa koko tunnelin profiiliin, joten aukon kohdalle tulevat kuormitukset joudutaan siirtämään sen viereisille rakenteille eli karmeille. Reiän kohdalle tuleva kenttämomentti M_{xm} lasketaan kaavalla (5) ja sen perusteella aikaisempia kaavoja (2, 3 ja 4) käyttäen saadaan laskettua lisäteräkset oven pieliin, jotka ottavat vastaan reiän kohdalle tulevat kuormat ja rasitukset.

$$M_{xm} = \left[0,125 + 0,19 * \frac{a}{Lx} * \left(\frac{2b}{Lx} \right)^2 \right] * Pd * Lx^2 \quad (5)$$

a = reiän leveys

b = reiän etäisyys tuelta

Lx = lyhyemmän sivun mitta

$$M_{xm} = 362,11 \text{ kNm}$$

Tarvittava lisäraudoitus reiän pieliin on laskettu kaavoilla 2, 3 ja 4.

$$A_s = 4068 \text{ mm}^2 \quad 9 \text{ kpl } 25 \text{ mm}^2 \text{ harjaterästankoja}$$

joten teräkset asennetaan 2 * 4 + 1 riviin.

6.6 Tuuletusreikien mitoitus

Ajatellaan reikä 1600 x 1600 neliömäisenä reikänä eikä ympyränä.

$$M_{xm} = \left[0,125 + 0,19 * \frac{a}{Lx} * \left(\frac{2b}{Lx} \right)^2 \right] * Pd * Lx^2 \quad (5)$$

a on reiän leveys

b on reiän etäisyys tuelta

Lx on lyhyemmän sivun mitta

$$M_{xm} = 359,16 \text{ kNm}$$

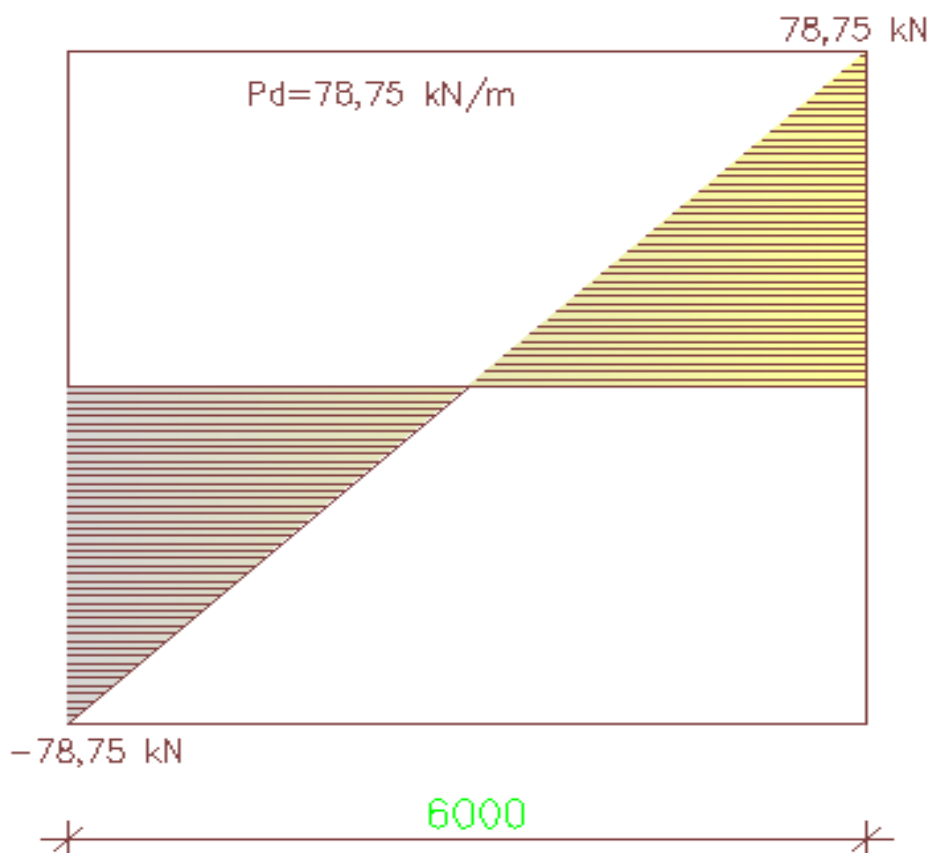
Tarvittava lisäraudoitus reiän pieliin on laskettu kaavoilla 2, 3 ja 4.

$$A_s = 4022 \text{ mm}^2$$

9 kpl 25 mm² harjaterästankoja

6.7 Leikkausraudoitus

Yleensä laattarakenteessa ei käytetä niin sanottua leikkausraudoitusta, koska ylä- ja alapinnan pääraudoitteet pystyvät vastaan ottamaan leikkausvoimasta aiheutuvan rasituksen. Kuitenkin rakenne saadaan lujemmaksi asentamalla hakateräksiä pääraudoitteiden väliin. Joka tapauksessa työteknisistä syistä tarvitaan työteräkset, jotta verkot saadaan pidettyä erilleen toisistaan. Samalla voidaan laskea hakateräksien määrä kyseiselle rakenteelle.



Kuva 3. Laattaan kohdistuvat leikkausvoimat

Kuvasta 3 näkyy maksimaalinen leikkausvoima mikä kohdistuu rakenteen ns. tuelle eli betoni- ja kallion väliselle rajapinnalle, joka on $78,75 \text{ kN}$

6.8 Leikkausraudoitettu rakenne

Kun rakenneosassa on vertikaalinen leikkausraudoitus voidaan käyttää kaavaa 6.

$$V_{rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} * z * f_{swd} \quad (6)$$

A_{sw} on leikkausraudoituksen poikkileikkausala

s on hakojen jakoväli

z on sisäisten voimien momenttivarsi

f_{swd} on leikkausraudoituksen myötölujuuden mitoitusarvo

Kaavaa 6 voidaan soveltaa muotoon:

$$A_{sw} = \frac{V_{rd,s}}{s} * z * f_{swd} \quad (7)$$

$$A_{sw} = 233 \text{ mm}^2/\text{m}$$

eli 2 x 16mm² hakateräksiä /m

6.9 Pääterästen ankkurointi

Pääteräsiin aiheutuva vetorasitus täytyy ankkuroida kallion seinämiin. Tässä kohdassa määritetään pituus tartuntateräksille, jotka juotetaan kallion sisään. Ankkurointipituus voidaan laskea Eurokoodi 2 mukaan kaavalla 8.

$$l_{b, rqd} = \frac{\Phi}{4} * \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}} \quad (8)$$

$$l_b = \frac{25mm}{4} * \frac{787,5N/mm^2}{3} \quad (8)$$

missä:

σ_{sd} on tangon mitoitus jännitys

f_{bd} on tartuntalujuus

Φ on tangon halkaisija

Ennen kuin tartuntapituus voidaan laskea, tarvitaan ensiksi tartuntalujuuden arvo, mikä saadaan taas kaavasta 9.

$$f_{bd} = 2,25 * \eta_1 * \eta_2 * f_{ctd} \quad (9)$$

η_1 on 1,0

η_2 on 1,0 kun $\Phi \leq 32mm$

f_{ctd} on $f_{ctk0,05} / 1,5 = 1,33$

$$l_{b,rgd} = 1640 \text{ mm} \quad \Rightarrow 2000mm$$

7 Tulosten analysointi

Olen itse työskennellyt tunneli- ja louhintatöissä parisen vuotta. Kyseitä arvoja ja mittoja arvioidessani, itselleni tuli sellainen tunne, että kyseisen mitoitus oli onnistunut. Kaikki harjaterästen paksuudet ja mitat vastasivat tämän hetkisiä lujitusmittoja ja malleja. Yleensä tämän kaltaisissa louhinta- ja lujitusurakoissa, jotka luokitellaan betonirakentamisessa isoihin suuruusluokkiin, ei käytetä pienempiä kuin 25 mm halkaisijaltaan olevia harjateräksiä. Esimerkiksi tartuntojen reikäväliksi mitoituksessa osoittautui 250 mm, joten tähänkin mitoitukseen olisi varmasti ollut jokin parempi ja tuotantotehokkaampi keino. Kuitenkin kyseinen jako pystytään toteuttamaan helposti, mutta kalustoa kuluu todella paljon. Poraaminen on yksi osa-alue louhinnassa, joka sitoo resursseja todella paljon.

Suunnitelmia pystytään kuitenkin muokkaamaan, jos työtekniilliset työt sitä vaativat. Työntekijät ovat tässä kohtaa avainasemassa suorittaessaan tuotantotyötä työmaalla. Suunnittelu on yksi iso osa rakenteen onnistumista. Suunnittelijan pitäisi ottaa huomioon työtekniilliset asiat, voidaanko rakennetta edes toteuttaa käytännössä. Eli tärkeää on ajatella asiaa myös työntekijöiden näkökulmasta, että rakenne on mahdollista toteuttaa.

8 Pohdinta

Työ lähtökohtaisesti tuntui mielenkiintoiselta, mutta kuitenkin olin varautunut pieniin ongelmiin suunnittelun ja mitoituksen aikana. Asiaa helpotti tietynlainen vapaus suunnittelussa ja itselläni oli ikään kuin vapaat kädet hallita kyseistä prosessia. Henkilökohtaisesti pidin vaikeana etsiä tietoa ja erilaisia laskentamalleja kyseiselle rakenteelle. Tiedot ja kyseiset kriteerit rakenteen ominaisuuksien täyttymiselle tuli suoraan suullisena määräyksenä työmaalta vastaavalta mestarilta ja toimitusjohtajalta. Käytännön ns. laskenta- ja suunnittelutyöt jäi itse tehtäväksi.

Aivan työn alkusuunnitteluvaiheessa olin miettinyt kyseistä työtä laskettavaksi laattarakenteena. Omassa koulutusohjelmassani perehdytään hyvin betonirakenteisiin, joiden teoriataustaa pystyin hyödyntämään insinööriyttä tehdessäni. Itse en ole vielä suorittanut tämänkaltaista projektityötä omin päin. Tämän kaltaisessa suuruusluokassa työ tuli minulle suurena haasteena.

Oletan että kyseistä rakennetta tullaan vielä jalostamaan ja parantamaan tästäkin mallista. Keskeistä projektille on, että haluaisin nähdä rakenteen toimivan käytännössä ja olla vaikka itsekkin toteuttamassa tätä tuotannollisessa mielessä louhintatyömaalla. Kyseisen rakenteen tuotantoa johtaessani pystyttäisiin itse päättämään työntekijöiden kanssa tulevista rakenneratkaisuista ongelmatilanteiden kohdatessa. Oman ammatillisen kehitykseni kannalta takia tämä olisi todella tärkeää.

Rakenteen toimivuuden kannalta ensimmäisenä asiana tulee esiin oven suuri koko suhteessa koko tunneliprofiiliin. Suuret tuulettimien reiät eivät tee asiaa helpommaksi. Seinän kapeuden takia raudituskin on hieman arveluttavaa, vaikka ongelmaa pystyttäisiin helposti korjaamaan ruiskuttamalla seinää huomattavasti paksummaksi. Kuitenkin olisi kaikkien kannalta parasta, että rakenne toteutettaisiin siten, kuten se on suunniteltukin.

Lähteet

Betonirakenteiden suunnitteluohje EC 2 osat 1-1 ja 1-2 / BY60 (päivitetty 2008)

Pöllä Jukka, (1988) Ruiskubetoni ja sen käyttö kallionlujittamisessa (Espoo)

RIL 154-1 ja 2 Tunneli- ja kalliorakennus osat 1 ja 2 (1987)

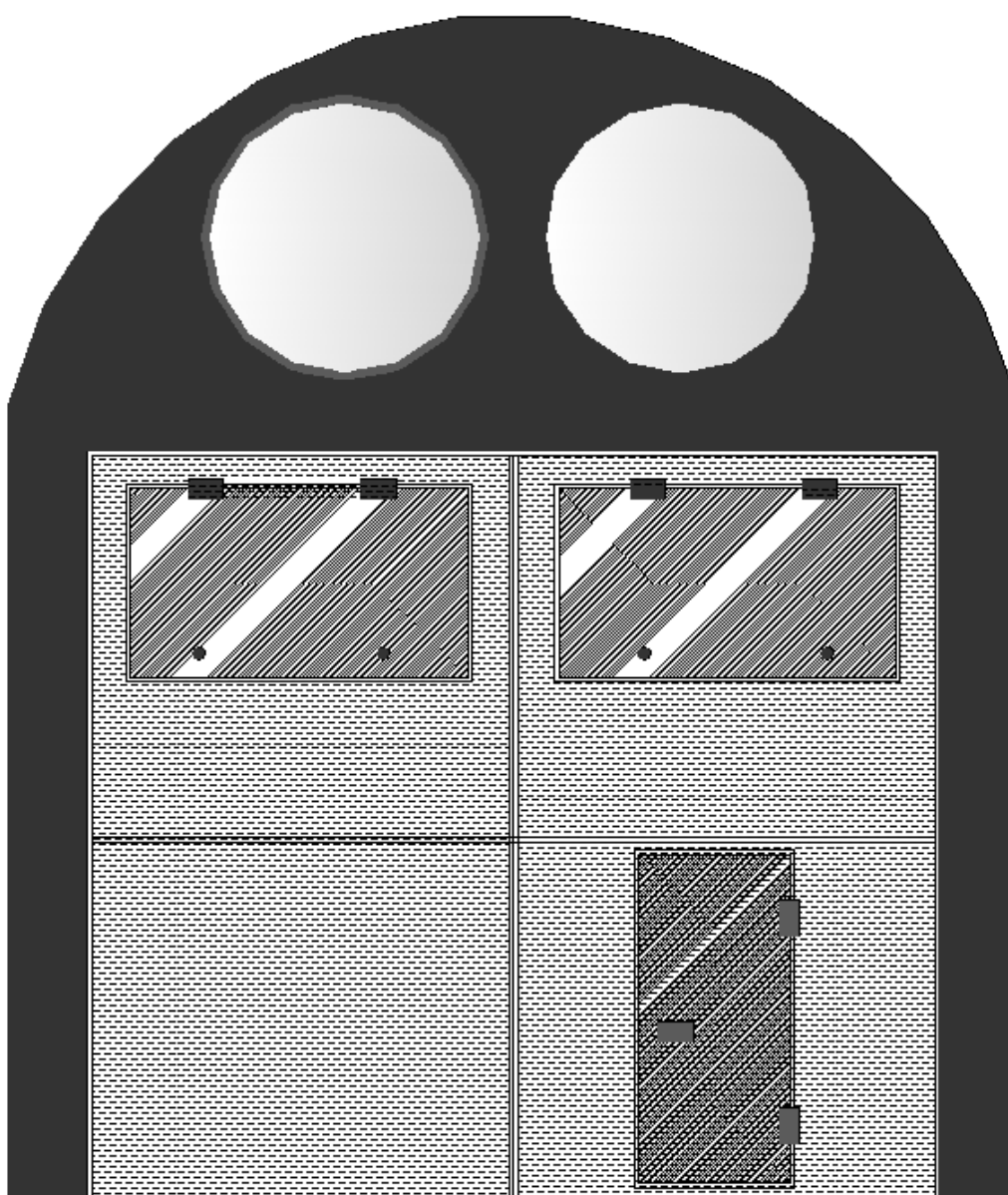
RIL 202-2011/BY 61-2011 Betonirakenteiden suunnitteluohje (2011)

SFS-EN 1991-1-6 EUROKOODI 1 (1984): RAKENTEIDEN KUORMAT: Osa 1-7: Onnettomuus kuormat

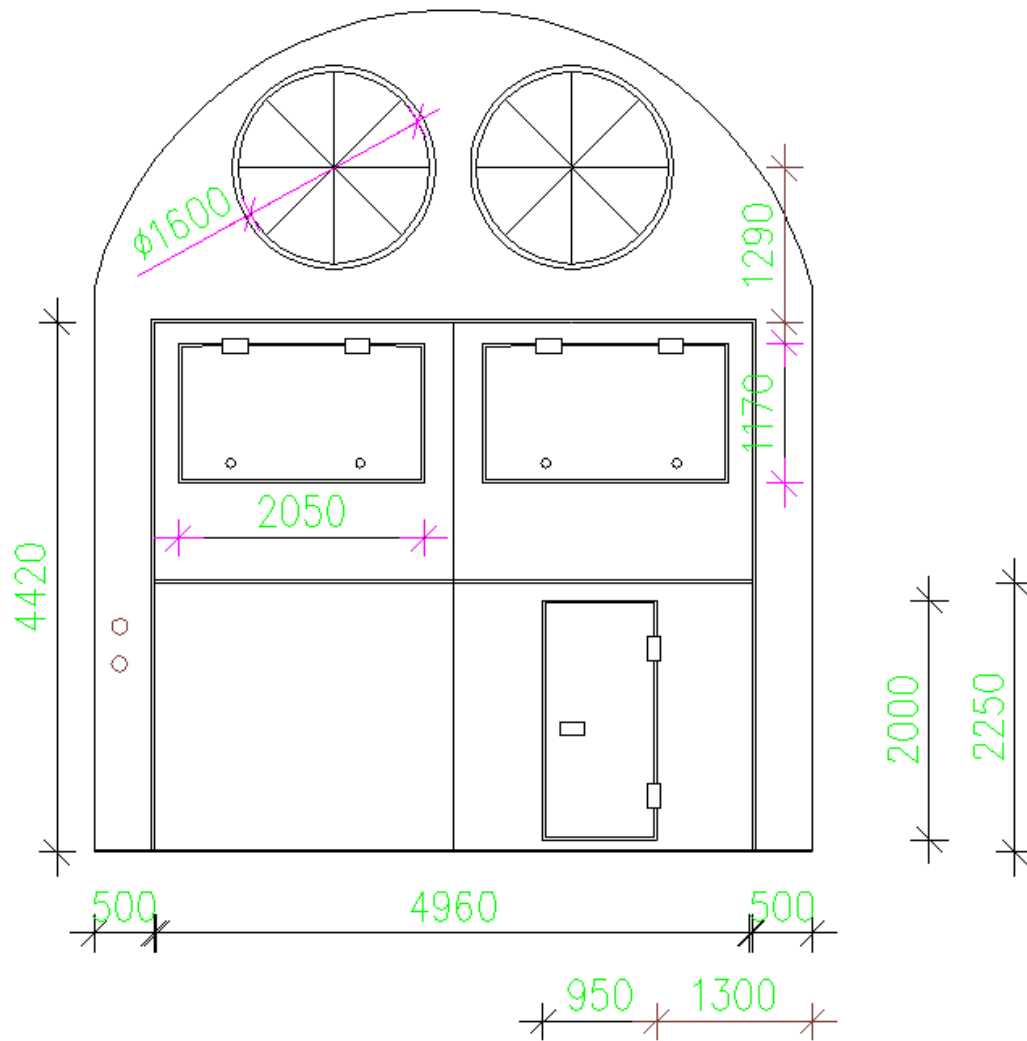
Suomen Betoniyhdistys ry BY 202 osat 1 ja 2 (1986)

Syrjänen, Pauli (Ruiskubetoni Betonitieto OY, Helsinki)

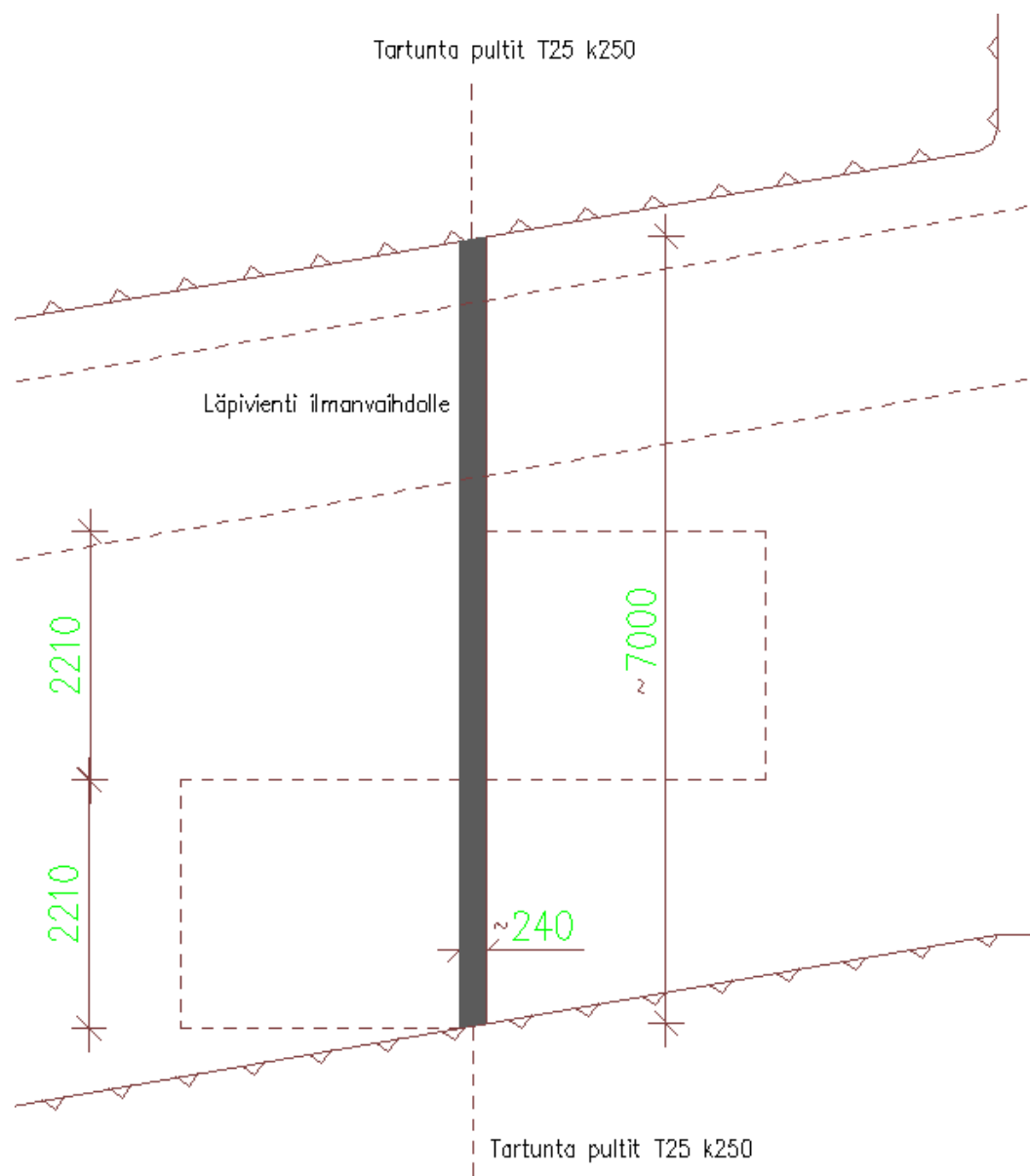
Liite 1 Suojaseinän mallinnuskuva



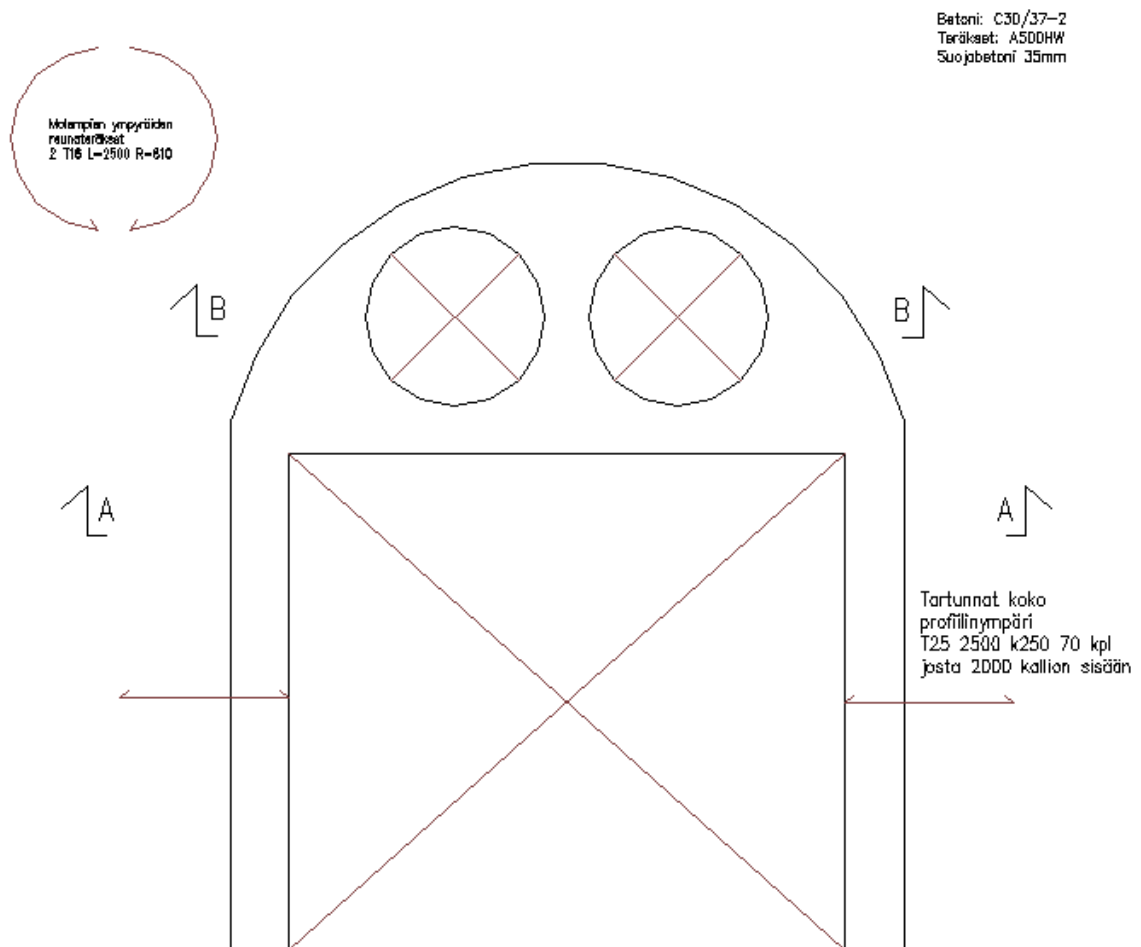
Liite 2 Suojaseinän mittakuva



Liite 3 Suojaseinän poikkileikkauskuva



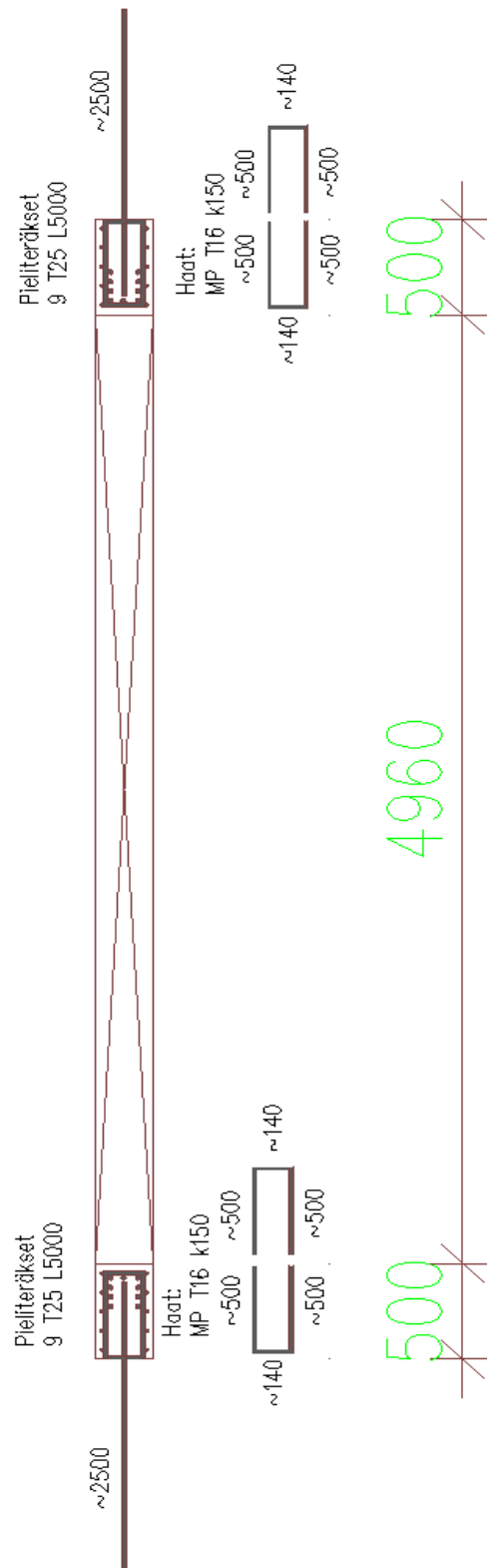
Liite 4 Suojaseinän raudoituskuv



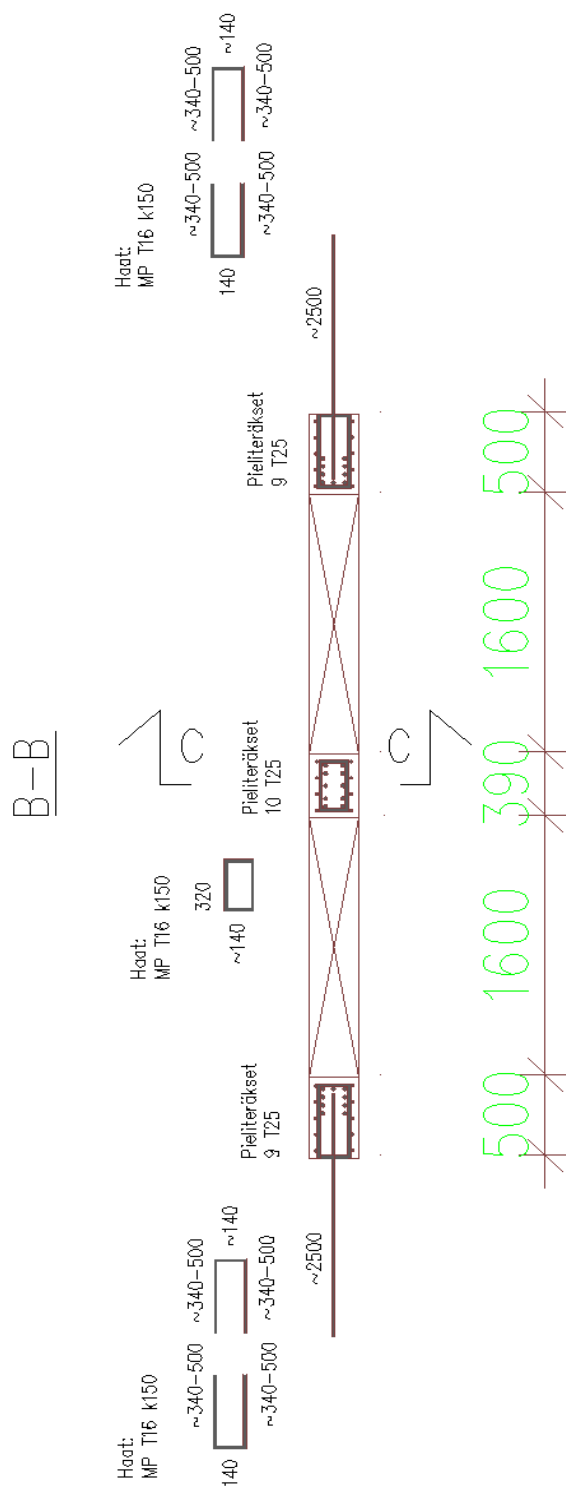
Koko profiilialueella horjateräsverkko MP 12mm k100

Liite 5 Suojaseinän rauditusleikkauskuva A-A

A-A



Liite 6 Suojaseinän rauditusleikkauskuva B-B



Liite 7 Suojaseinän rauditusleikkauskuva C-C

C—C