Notat

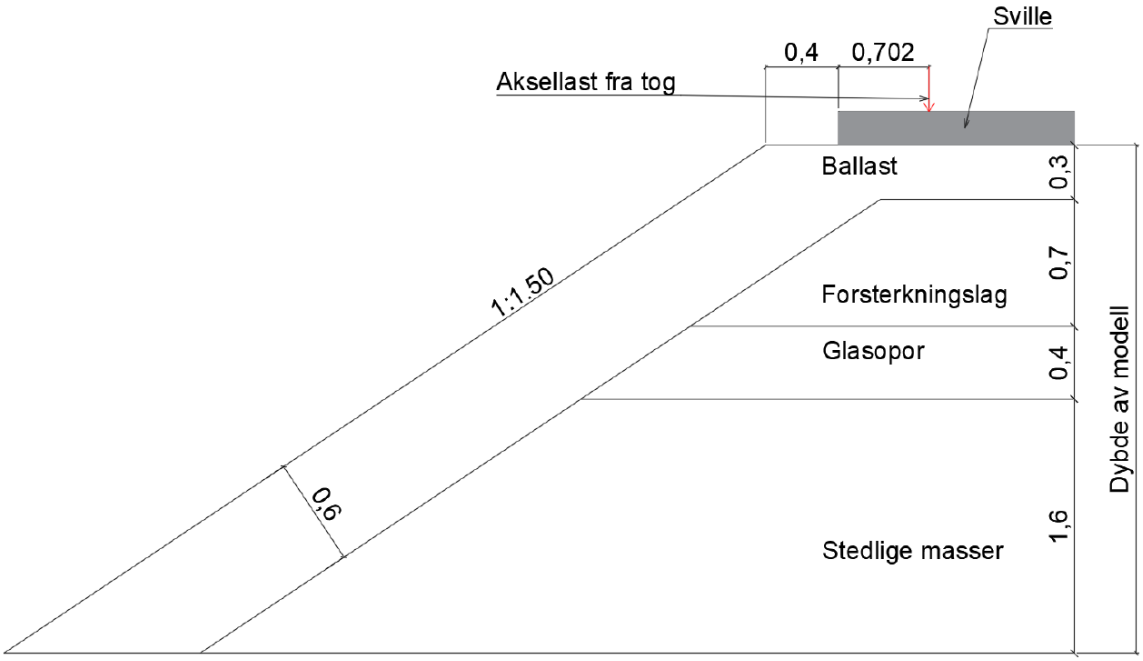
Til: Juan Barrera. Teknologi og Regelvek, Over- og underbygning
Fra: Geir Svanø
Telefon: 920 18 311
Dato: 2019-08-27
Saksref.:
Kopi til:

Skumglas i underbygning for jarnbane – last og kapasitet.

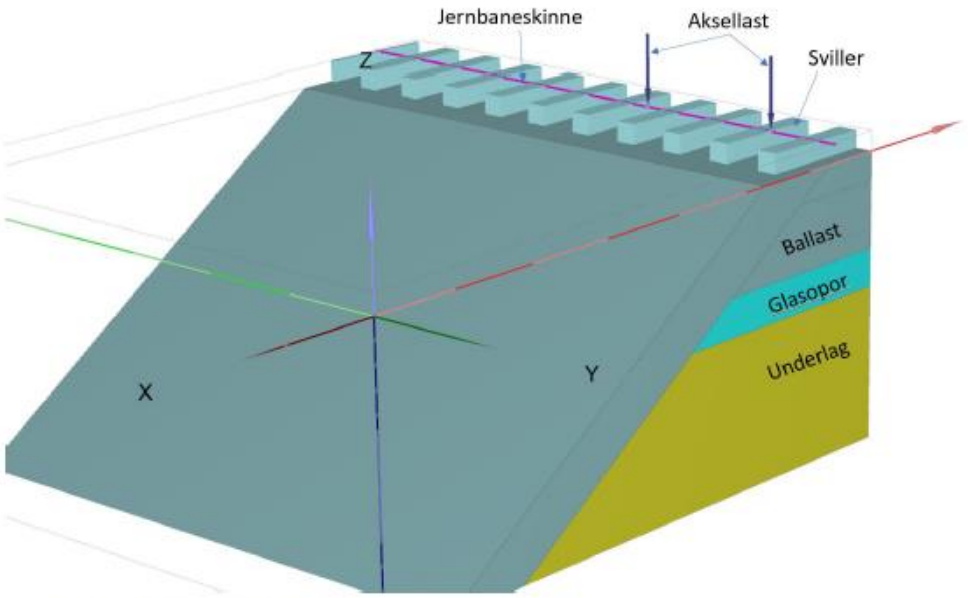
Norconsult har på oppdrag frå¨Glasopor AS utført Finite element - berekningar av jarnbanefyllingar med skumglas under forsterkingslaget. Målet var å berekne kor store spenningar skumglaset blir utsett for. Desse spenningane skal samanliknast med resultat frå laboratorieforsøk på skumglas for å vurdere kor høgt oppe i fyllinga det kan brukast skumglas.

Spenningsberekningar frå Norconsult

Norconsult har analysert verknaden av aksellaster på ei fylling med skumglas. Lastene er gitt i samsvar med lastmodell 71, og er fire aksellaster kvar på 250 kN med 1,6 meter akselavstand. Det er antatt at det er eit vertikalt symmetriplan langs spormidt og eit vertikalt symmetriplan tvers på sporet midt mellom aksel 2 og aksel 3, og elementmodellen utnyttar desse symmetriplana.



Figur 1. Tverrsnitt av elementmodell. Halve breidda er modellert pga symmtri



Figur 3 Utklipp fra modellen i PLAXIS 3D

Figur 2. Utklipp av elementmodellen..

Skinna er modellert som bjelke. Aksellastene (250/2= 125 kN) er lagt på skinna, første last i avstand 0,8 m frå symmetriplanet ved enden av modellen, andre last er lagt (0,8+1,6)=2,4 m frå symmetriplanet

Ballast under svilla er modellert, men ballast over dette nivået er dødvekt.

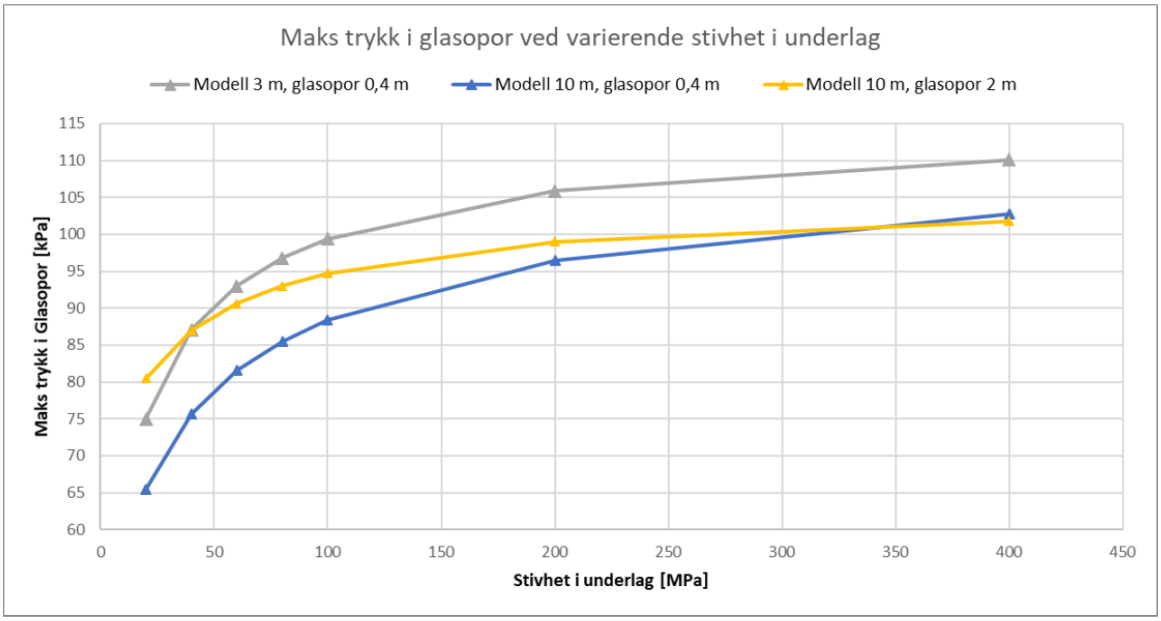
Ulike høgder og stivheit på fyllinga under skumglaset er modellert. To høgder av skumglas er modellert, eit 0,4 m tjukt lag, og eit 2 m tjukt lag.

Material	Tyngdetetthet [kN/m^3]	E [MPa]	Poissons forhold [-]	Kommentar
Ballast	19	200	0,2	Realistisk verdi basert på stivheter funnet i dynamisk treaksialforsøk, se Ref. 1 og Ref. 3.
Glasopor	3	160	0,1	Realistisk verdi basert på stivheter funnet i dynamisk treaksialforsøk, se Ref. 4.
Underlag	19	100	0,2	Antatt stivt underlag. Stivheter av underlaget diskuteres i kapittel 6. Varieres mellom 20 MPa og 400 MPa.
Betong	25	30*10^3	0,2	

Tabell 1. Parametrar brukt i endeleg element-berekningane. Parametrar for «Underlag» er variert som vist i Tabell 2, som presenterer resultat.

E – silt [MPa]	3 m dyp modell 0,4 m tykk Glasopor		10 m dyp modell 0,4 m tykk Glasopor		10 m dyp modell 2 m tykk Glasopor	
	Trykk bunn [kPa]	Trykk bunn [kPa]	Trykk bunn [kPa]	Trykk bunn [kPa]	Trykk bunn [kPa]	Trykk bunn [kPa]
400	110,1	101,7	105,4	102,8	100,4	101,8
200	105,9	97,7	99,2	96,5	97,9	99,0
100	99,4	91,8	90,5	88,4	93,7	94,7
80	96,8	89,4	87,2	85,5	91,8	93,0
60	93,0	86,1	82,6	81,6	89,1	90,6
40	87,1	80,8	75,6	75,7	84,7	87,0
20	75,0	70,6	63,3	65,4	75,9	80,5

Tabell 2. Trykk mot topp av skumglas – parametervariasjon (Merk: Det er skrivefeil i tabellen – det skal vere «Trykk topp» og «Trykk bunn»)



Figur 3. Trykk mot skumglas , frå Norconsults rapport

Spenningar med alfa-faktor lik 1,33

Norconsults berekningar gjeld aksellast lik 25 tonn. For utbygging av Austfoldbanen gjeld alfa-faktor lik 1,33, som betyr 33,3 tonn aksellast. Totalspenningane mot topp av skumglaset vil då stige med om lag 30%.

Kontrollberekning av Bane NOR

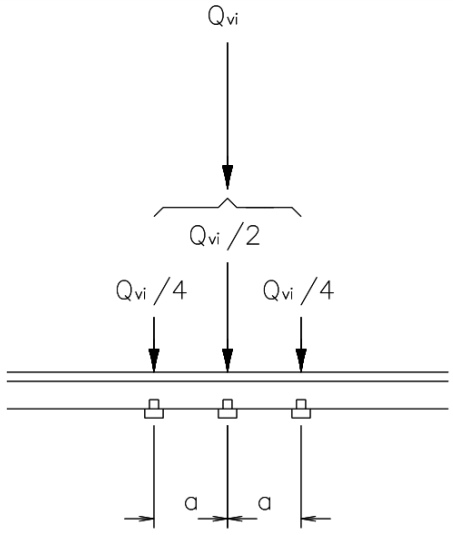
Berekningane gir høgare trykk mot skumglaset enn venta. Bane NOR har derfor gjort ei kontrollberekning med elastisitetsteori. Det er tatt utgangspunkt i stripelast på uendeleg halvrom frå boka «Elastic solutions for soil and rock mechanics» av Poulos & Davis (ref. /1/), sjå vedlagt side frå boka i Vedlegg 2.

Det er gjort utrekningar for aksellast 250 kN, med fire akslar med akselavstandar på 1,6 m i samsvar med LM71, og fire akslar med akselavstand i samsvar med referansevogn E5 i NS-EN 15528, det vil seie akselavstand 1,8m – 3,0m – 1,8m ettersom avstanden mellom boggi for to samankopla vogner er 2*1,5 = 3,0 m. (Sjå Vedlegg 1,)

Referansevogn E4 ville gitt same resultat.

Aksellastene er fordelt på sviller som vist i Figur 4 (Frå Eurokode NS-EN 1991-2) , men ein parametervariasjon er inkludert der svilla under akselen tar 70% til 100% av aksellasta. Det er rekna 0,25 m svillebreidde og trykket under svilla er rekna for svillelengde 2,5 m og svilleareal 0,25x2,5 = 0,625 m^2 . (Svillelengda inngår ikkje på annan måte enn å berekne trykket i den elastiske løysinga ettersom løysinga er i 2D).

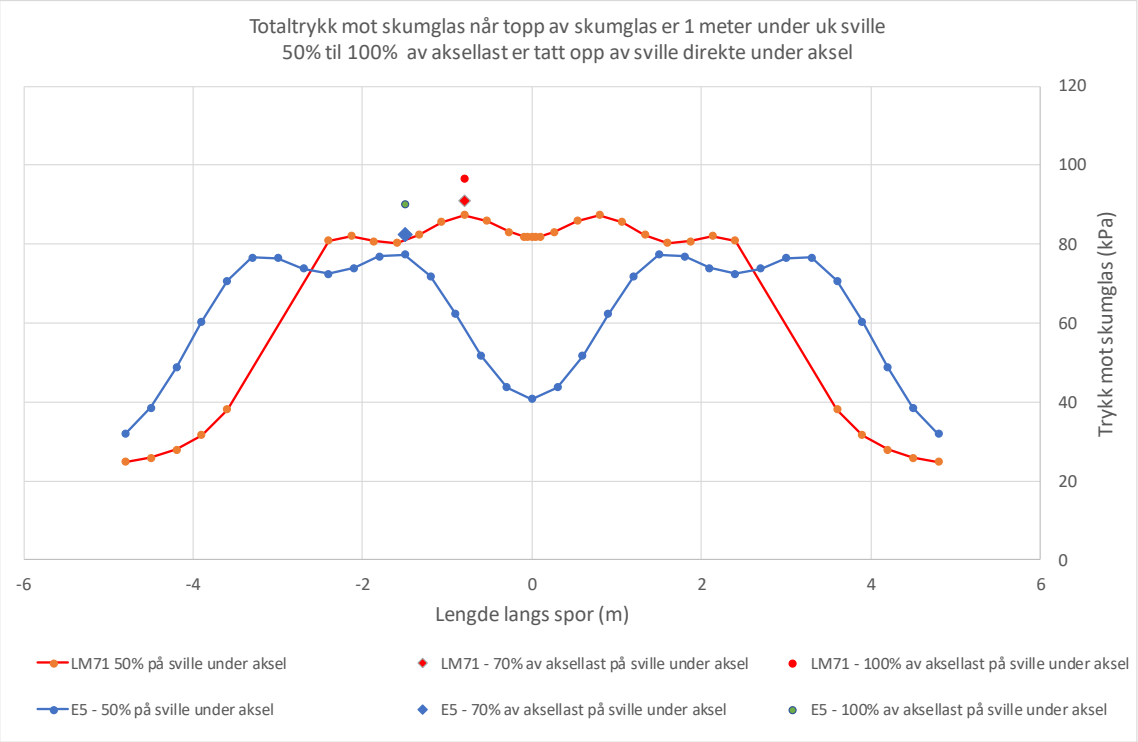
Den elastiske løysinga gir vertikal spenning i vektlaus jord på grunn av lasta, men overlagringstrykk svarande til tyngdetetthet 19 kN/m^3 er lagt til spenninga.



Figur 4 Fordeling av aksellast på sviller

Figur 5 viser trykk mot skumglas når topp skumglas er 1,0 m under uk sville, for akselavstandar i samsvar med LM71 og for akselavstandar i samsvar med referansevogn E5 (E4 ville gitt same resultat). Under kritisk aksel varierer trykket mo skumglaset mellom 77,3 kPa og 96,5 kPa avhengig av akselavastandar og prosent av aksellast på sville direkte under aksel.

For LM71 varierer trykket mellom 87,4 kPa og 96,5 kPa. Elastisitetsteorien svarar til konstant E-modul og resultatet må derfor samanliknast med stivheit i underlaget på 160 kPa i Norconsults FEM-modell fordi i denne modellen er E=160 MPa for skumglaset. FEM-modellen gav cirka 93 kPa for E=160 MPa modellen med 0,4 m skumglas og 10 m høg modell (svarande til 10 m til «berg»). Modellen frå elastisitetsteorien bekreftar dermed Norconsults modell.



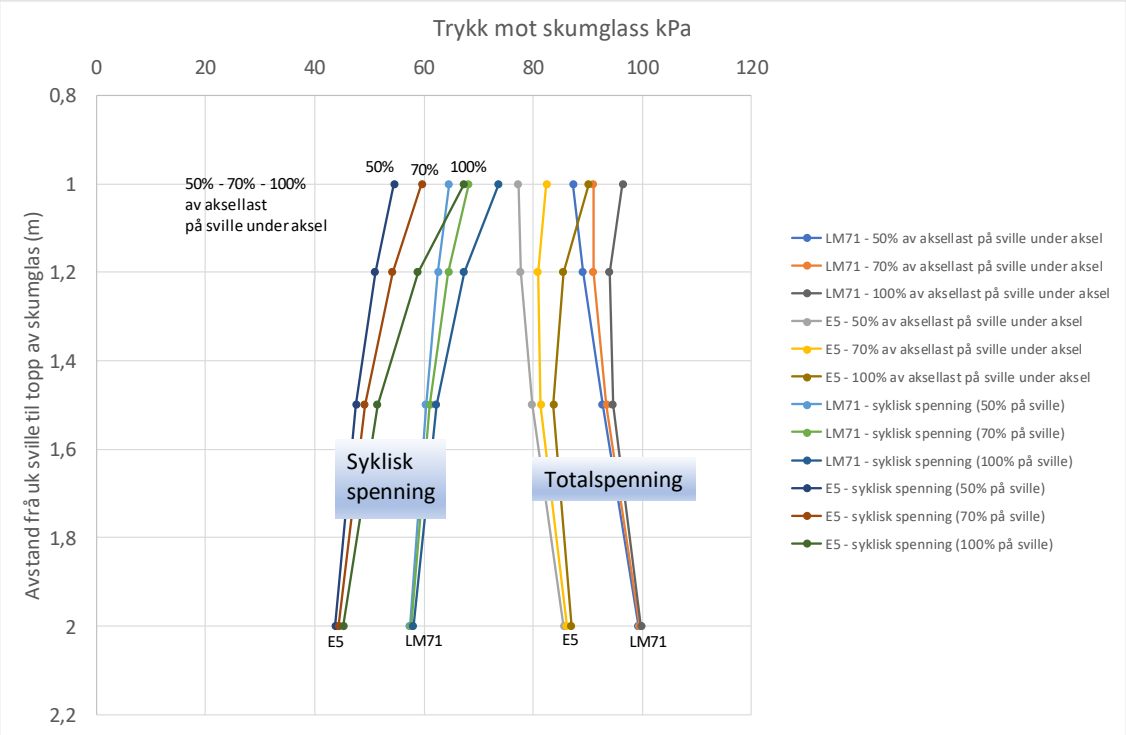
Figur 5 Trykk mot skumglas når topp skumglas er 1 m avstand frå uk sville

For 2 m tjukt lag av skumglas gir FEM-analysen ca 5 kPa høgare trykk for E=160 MPa, men det er truleg fordi det er trykket i underkant av skumglaset som er plotta, og dette blir større på grunn av eigenvekt i skumglaset.

LM71 er ein lastmodell for bruer, og TSI INF seier at den skal også brukast for «earthworks». Men om vi likevel studerer spenningane i topp skumglas for referansevogn E5 som har lengre akselavstandar, ser vi at maksimalt trykk går ned frå 87.4 kPa til 77,3 kPa for antakelsen 50% av akselllast på svilla under aksel. Maksimalt trykk for E5 er altså 12% under maksimalt trykk for LM71.

Norconsults modell gir betydeleg høgare trykk for modellen som er 3 m høg, dvs 3 m til «berg». Det må skuldast at vi får liten effekt av lastfordeling i forsterkingslaget når avstanden til berg er kort, slik at fyllinga under forsterkingslaget må «gi etter» litt for at forsterkingslaget skal gje ein lastfordelande effekt.

Figur 6 viser at sjølv om den sykliske spenninga (=trykkbidrag frå aksellast) avtar mot djupna så er likevel totalspenninga (=eigenvekt av jord + trykkbidrag frå aksellast) er relativt konstant mot djupna.



Figur 6 Spenningar mot djupne under uk sville etter elastisitetsteori

Syklisk styrke av skumglas

Referanse /2/: «Sykliske treaksialforsøk»

SINTEF-rapporten «Treaksialforsøk med repetert last på HASOPOR lätt» (ref /2/) presenterer resultat frå sykliske treaksialforsøk på Hasopor med pårøvestorleik Ø300mm og høgde 600mm. Tre forsøk blei utførde, alle med 20 kPa omslutningstrykk. Rapporten viser at for syklisk deviatorspenning på 60 kPa vil vi få 2% – 2,5% akkumulert vertikaltøyning etter 2 million syklar. 60 kPa syklisk deviatorspenning betyr at vertikalspenninga blei sykla mellom 25 kPa og 85 kPa.

2% til 2,5% deformasjon vil for 300 mm tjukt lag for frostisolering svare til 6mm til 7,5 mm setning i skumglas-laget, som lett kan korrigerast med pakking av spor. Eit 2000 mm tjukt lag med skumglas som lettfylling på blaut grunn vil få 40 mm til 50 mm setning i skumglas-laget, som er innanfor krava til setning.

Det var planlagt å auke den sykliske deviatorspenninga til 80 kPa slik at totalspenninga skulle bli 105 kPa, men det blei ikkje gjennomført. Basert på resultatet med 60 kPa syklisk deviatorspenning blei det vurdert at 80 kPa ville gitt deformasjonar større enn kapasiteten for utstyret, som er 4% - 5%. Deformasjonen for 80 kPa deviatorspenning er dermed ukjend.

Tøyning indusert av syklisk last er derfor dokumentert for syklisk deviatorspenning opp til 60 kPa, som inneber total vertikalspenning opp til 85 kPa. Prøvene viste ikkje utflating i utviklinga av deformasjon, men etter ca 1,5 million syklar er gradienten liten.

Nedknusinga av materialet under syklisk testing var minimal, basert på siktekurver før og etter treaksialforsøk.

Referanse /3/ «Sykliske treaksialforsøk»

Figur 7 viser resultat frå SINTEFs med sykliske treaksialforsøk på Glasopor i 2009. Lastfrekvensen var 5 Hz slik at 2000 sekund svarar til 10 000 lastsyklar. Syklisk deviatorspenning er stigande: 20 ➔ 40 ➔ 60 ➔ 80 ➔ 100 kPa.

Den øvste kurva er for 20 kPa konsolideringsspenning som er representativt for spenningsnivået i skumglaset når der ikkje er toglast. Vi ser at for denne konsolideringsspenninga utviklar deformasjonen seg raskt for 80 kPa deviatorspenning, Dette var største moglege laststeget for denne konsolideringsspenninga, og i dette laststeget syklar vertikalspenninga mellom 20 kPa og (20+80)=100 kPa.

For 60 kPa syklisk deviatorspenning (svarande til 80 kPa maksimal vertikalspenning) flatar deformasjonskurva seg ut.

Referanse /4/: «Ødometerforsøk»

SP har testa skumglas etter SP-metode 2563, som er utvikla for lettklinker. I denne metoden blir materialet vibrert inn i ein stålsylinder, og deretter blir lastsyklar med trykk 10-120 kPa påført. Standard prosedyre er 2 million lastsyklar, men 10 million lastsyklar blei påført. Deformasjonar blir målt, og prøvematerialet blir sikta før og etter.

Tre prøvingar blei utførde i «liten» sylinder med fraksjon mindre enn 40mm, og tre i «stor» sylinder med komplett prøve.

Under kompaktering med vibrasjon var setninga for skumglas 27% til 29%, som er meir enn dobbelt av observert setning for referanseprøver av lettklinker. Deformasjonen etter 10 million syklar var 1,6% til 1,9% for liten sylinder, og 2,3% til 4,0% for stor sylinder med komplett prøve. Det var observert at større bitar av materiale hadde ein tendens til å sprekke i mindre bitar, som kan forklare den større deformasjonen for komplett prøve.

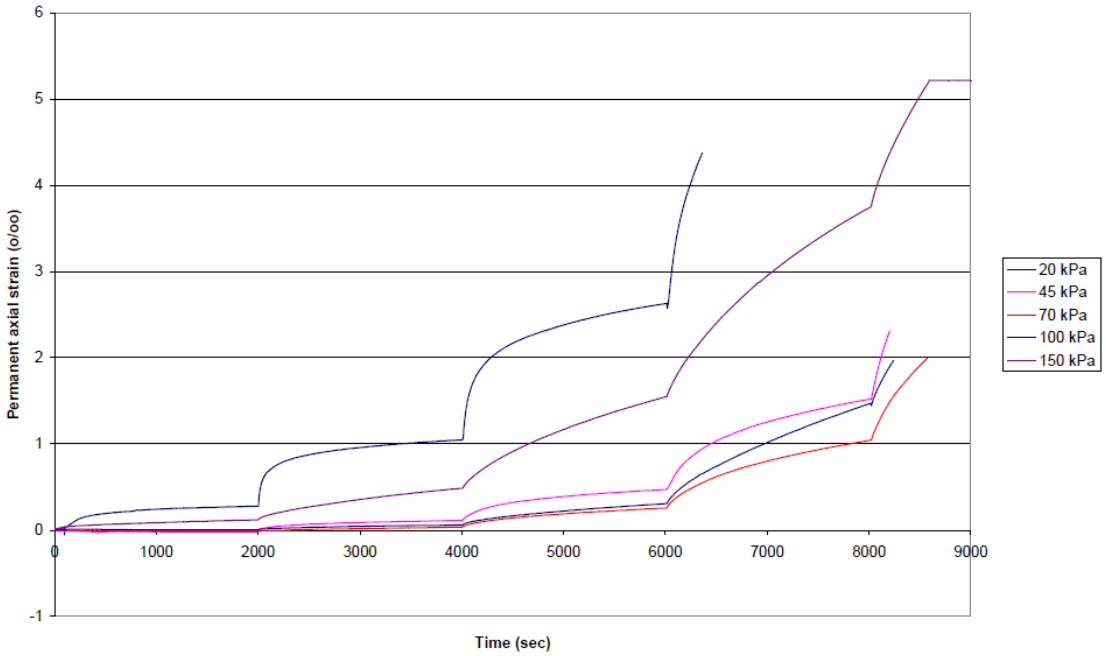
For stor sylinder var setningsutviklinga frå 2 million til 10 million syklar 0,3% til 0,7%.

Det oppstod betydeleg nedknusing av materialet med produksjon av finstoff mindre enn 2mm. Det er sannsynleg at ein betydeleg del av denne nedknusinga oppstod under kompaktering der deformasjonen var størst.

Vurdering:

Sykliske treaksialforsøk dokumenterer deformasjon for lastsyklar som gir opp til 85 kPa i total vertikalspenning. Forsøka viser at vi kan få 2 til 2,5% tøyning etter 2 million syklar, og det blir liten eller ingen nedknusing. Det er ei akseptabel tøyning.

Prøving i stålsylinder med syklisk last mellom 10 kPa og 120 kPa gir opp til 4% tøyning, men har betydeleg nedknusing. Nedknusinga kan vere knytt til kompaktering av prøven med vibrasjon ved innbygging.



Figur 7: Tøying mot tid for sykliske treaksialforsøk på Glasopor, Figur 4 i Ref /4/. Lastfrekvens 5 Hz. Konsolideringsspenning er gitt i figurforklaringa. Syklisk deviatorspenning er stigande: 20 – 40 – 60 – 80 – 100 kPa

Spennings-tøynings-tilstanden i skumglas under sporet er noko meir innspent lateralt enn i treaksialforsøket, fordi horisontalspenninga kan auke under belastning. Med eit typisk Poissons-forhold for skumglas på 0,1 vil 60 kPa tilleggspenning vil svare til 6,6 kPa tillegg i horisontal-spenning. Effekten er ikkje stor, men kan likevel bidra til å stabilisere skumglaset. Representativ tilstand kan derfor vere ein stad mellom treaksialtilstand (der horisontalspenniga er konstant og lik 20 kPa) og tilstanden i ein stålsylinder (der horisontalstøyninga = null).

Når skumglaset ligg under sporet er det derfor mogleg at større trykk enn 85 kPa kan tolast, men samtidig er testomfanget svært lite. Det er derfor anbefalt å begrense trykket i skumglaset til 85 kPa.

Det er mogleg at ein studie av horisontaltøyingane i skumglaset i FE-analysane kan svare på om tilstanden i skumglaset svarar til randvilkåra i treaksialforsøket (Ref. /2/ og /3/ eller «ødometerforsøket» i stålsylinder (Ref /4/).

Dette ville kanskje gje svar på om tjukkare forsterkingslag kan gje gunstigare tøyningsforhold, nærare ødometertilstand, slik at større spenningar kan tolast.

Sluttvurdering

Normalkonsolidert leire

For blaut, normalkonsolidert leire kan vi anta E_{max} = 1500 til 2000 gongar s_U, slik at for s_U = 15 kPa vil det svare til E_{max} = 23 MPa til 30 MPa. Syklisk stivheit kan bli lågare på grunn av tøyningsnivået i undergrunnen.

For dette området av stivheit vil Norconsults løysing for 10 meter høg modell svare til 73 kPa (blå kurve i Figur 3) til 85 kPa (gul kurve i Figur 3) totaltrykk i skumglaset, det største trykket med 2 meter tjukt lag med skumglas. Trykket vil reduserast for referansevogn E5, men trykkreduksjonen kan bli mindre enn det som er rekna ut basert på den elastiske løysinga fordi det stive skumglaset over den mjuke undergrunnen vil gje større lastspreiing enn for ein elastisk modell med homogen stivheit. Lasta frå LM71 har derfor allereie fått ei lastspreiing som gjer at forskjellen mellom LM71 og referansevogn E5 er mindre enn for den elastiske modellen. Om vi anslår 5% reduksjon for vogn E5 blir trykket i skumglaset rundt 70 kPa til 80 kPa.

Skumglas kan derfor brukast som lett masse på blaut undergrunn for spor med alfafaktor = 1,0, men ikkje for alfafaktor = 1,33.

Merk at når der er nødvendig å forsterke undergrunnen på grunn av dynamikk kan undergrunnen bli stiv og spenningane i skumglaset blir større..

Siltig grus eller siltig sand

På undergrunn av telefarlege grusige eller sandige materiale kan det vere ønskeleg å bruke skumglas til frostisolering, og det vil vere den blå kurva i Figur 3 som gjeld. Slik undergrunn kan ha dynamisk eller syklisk stivheit som er høgare enn for undergrunn av leire. Med resulterande stivheit større enn 80 MPa vil spenningane i skumglaset bli høgare enn 85 kPa som er rekna som kritisk maksimal grense.

Total vertikal spenning mot skumglaset bør ikkje vere høgare enn 80 kPa, som skal inkludere lastverknad av aksellaster og vekt av forsterkingslag, ballast og sville/skinne.

Bruken av skumglas for frostsikring må derfor vurderast særskilt i kvart enkelt tilfelle.

Alfafaktor

Skumglas kan ikkje brukast for baner med alfafaktor større enn 1,0

Referansar

/1/ Poulos HG and Davis EH (1974) «Elastic solutions for soil and rock mechanics» John Wiley & Sons. Reprinted in 1991 by Centre for geotechnical research, Univ of Sydney

/2/ SINTEF SBF2015 F0175 «Treaksialforsøk med repetert last på HASOPOR lätt» 2015-04-23, Kjell Arne Skoglund

/3/ SINTEF SBF IN F09005: «Cyclic triaxial tests and static triaxial tests on Glasopor cellular glass fill» 2009-02-05, Inge Hoff

/4/ SP Bygg & Mekanik: «Provning av skumglas som lättballast – del 2» Rapport ved P-A Johansson, G. Malmqvist, G.Söderlind, merka «Projetknummer 4P03400

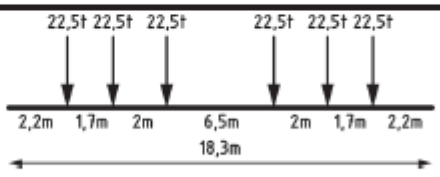
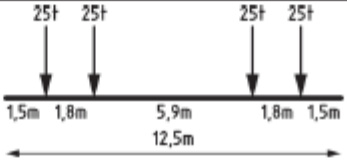
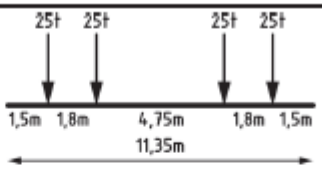
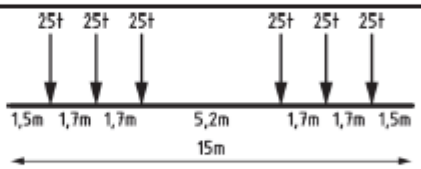
/5/ Norconsult Doknr. 5186957-RIG01: Vurdering av lastfordeling i jernbanefyllinger med Glasopor « 2018-12-21. , Lars G Botnen

Med vennlig hilsen

Teknologi og regelverk
Over- og underbygning

Geir Svanø
Senioringeniør, geoteknikk

VEDLEGG 1 Tabell frå NS-EN 15528

Reference wagon	Axle load *P* (t)	Geometrical characteristics	Mass per unit length *p* (t/m) [a]
xL-b	22,5		7,4
E4	25,0		8,0
E5	25,0		8,8
E6	25,0		10,0
Additional reference wagons may be used to manage special traffic on specific lines (e.g. reference wagon F with axle load *P* equal to 27,5 t or G with axle load *P* equal to 30,0 t).			
[a] The value for "*p*" results from the relationship: (number of axles) x *P*/(length of reference wagon). The reference wagon is defined by "*P*" and the geometrical characteristics.			

VEDLEGG 2 Side 36 frå «Elastic solutions for soil and rock mechanics» av Poulos & Davis

Chapter 3
DISTRIBUTED LOADS ON THE SURFACE OF A SEMI-INFINITE MASS

3.1 Loading on an Infinite Strip

3.1.1 UNIFORM VERTICAL LOADING (Fig.3.1)

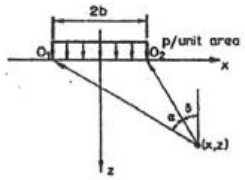


FIG. 3.1

$$\sigma_z = \frac{p}{\pi}[\alpha + \sin\alpha\cos(\alpha+2\delta)] \quad \ldots (3.1a)$$

$$\sigma_x = \frac{p}{\pi}[\alpha - \sin\alpha\cos(\alpha+2\delta)] \quad \ldots (3.1b)$$

$$\sigma_y = \frac{2p}{\pi}\nu\alpha \quad \ldots (3.1c)$$

$$\tau_{xz} = \frac{p}{\pi}\sin\alpha\sin(\alpha+2\delta) \quad \ldots (3.1d)$$

$$\sigma_1 = \frac{p}{\pi}[\alpha + \sin\alpha] \quad \ldots (3.1e)$$

$$\sigma_3 = \frac{p}{\pi}[\alpha - \sin\alpha] \quad \ldots (3.1f)$$

$$\tau_{max} = \frac{p}{\pi}\sin\alpha \quad \ldots (3.1g)$$

Loci of constant σ_1 and σ_2 are circles passing through O_1 and O_2.

Loci of constant τ_{max} are circles passing through O_1 and O_2.

Trajectories of σ_1 are a family of confocal hyperbolas, foci at O_1 and O_2. These curves bisect the angle, α, at all points.

Trajectories of σ_2 are a family of confocal ellipses, foci at O_1 and O_2.

Trajectories of τ_{max} are two orthogonal families: equiangular spirals intersecting the ellipses under 45°.

Maximum $\tau_{max} = p/\pi$, occurs at all points of the semi-circle through O_1 and O_2.

Maximum $\sigma_1 = p$, occurs at points $(x,0)$, $-b<x<b$.

Minimum $\sigma_3 = 0$, " " " $(x,0)$, $-b>x>b$.

Values of σ_x, σ_z, τ_{xz}, σ_1 σ_3 and τ_{max} are tabulated in Table 3.1, and contours of σ_z and τ_{max} are given in Fig.3.2 (Jurgenson, 1934).

As for line loading, displacements due to strip loading on or in a semi-infinite mass are only meaningful if evaluated as the displacement of one point relative to another point, neither point being located at infinity. The vertical displacement at the surface, relative to the centre of the strip, is given by

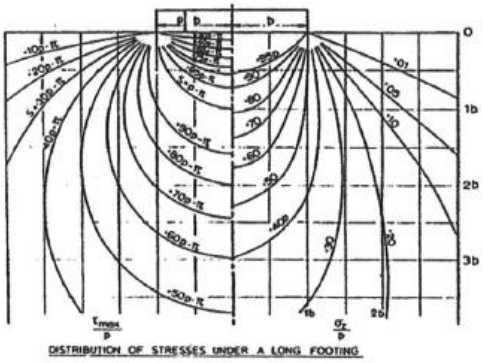


FIG. 3.2 Stresses beneath a strip (Jurgenson, 1934).