

Intern rapport

Intern rapport nr. 2140

Fundamentering på fyllinger av
Ekspandert polystyren
10-års erfaring

OK
Kobler



Statens vegvesen
Vegdirektoratet

Februar 2000

Vegteknisk avdeling

Fundamentering på fyllinger av Ekspandert polystyren 10-års erfaring

Sammendrag

Etter at metoden med bruk av Ekspandert polystyren (EPS) som lett fyllmasse ble introdusert for nærmere 30 år siden i Norge har det siste 10 året ført både til økt bruk internasjonalt og til introduksjon av stadig flere bruksmåter. I tillegg til reduksjon av vertikallast kan fordelene ved å benytte EPS også omfatte redusert horisontalbelastning, kompensert fundamentering for bygg, vertikale endeavslutninger, lastreduksjon på betongrør, midlertidige omlegginger og redusert byggetid.

Denne artikkelen tar for seg spesielle løsninger med bruk av EPS som underlag for brulandkar. Det er beskrevet 3 eksempler i tillegg til et skalaforsøk.

Artikkelen er presentert på Geoteknikkdagen i Oslo 1999.

Emneord:

Ekspandert polystyren, fyllinger, brufundamentering, setninger og stabilitet

Kontor:

Geoteknisk kontor

Saksbehandler:

Roald Aabøe, Anne Braaten

Dato:

Februar 2000

FUNDAMENTERING PÅ FYLLINGER AV EKSPANDERT POLYSTYREN - 10 ÅRS ERFARING

Senioringeniør Roald Aabøe, Vegteknisk avdeling, Vegdirektoratet
Overingeniør Anne Braaten, Vegteknisk avdeling, Vegdirektoratet

Sammendrag

Etter at metoden med bruk av Ekspandert polystyren (EPS) som lett fyllmasse ble introdusert for nærmere 30 år siden i Norge har det siste 10 året ført både til økt bruk internasjonalt og til introduksjon av stadig flere bruksmåter. I tillegg til reduksjon av vertikallast kan fordelene ved å benytte EPS også omfatte redusert horisontalbelastning, kompensert fundamentering for bygg, vertikale endeavslutninger, lastreduksjon på betongrør, midlertidige omlegginger og redusert byggetid.

Denne artikkelen tar for seg spesielle løsninger med bruk av EPS som underlag for brulandkar. Det er beskrevet 3 eksempler i tillegg til et skalaforsøk.

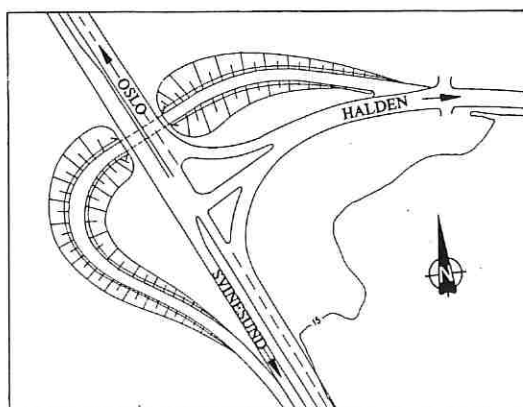
Summary

Some 30 years of experience with Expanded Polystyrene (EPS) as a lightweight filling material have brought about both a wider use on a global scale and introduction of a number of different design applications. In addition to reduced vertical loads, advantages from using EPS may also include reduced horizontal loads, simplified designs and increased speed and ease of performing construction activities.

This article describes special applications of EPS support for bridge abutments. 3 examples and one scale test are mentioned.

Løkkeberget bru - Midlertidig bru fundamentert på en EPS-fylling

Orientering om prosjektet

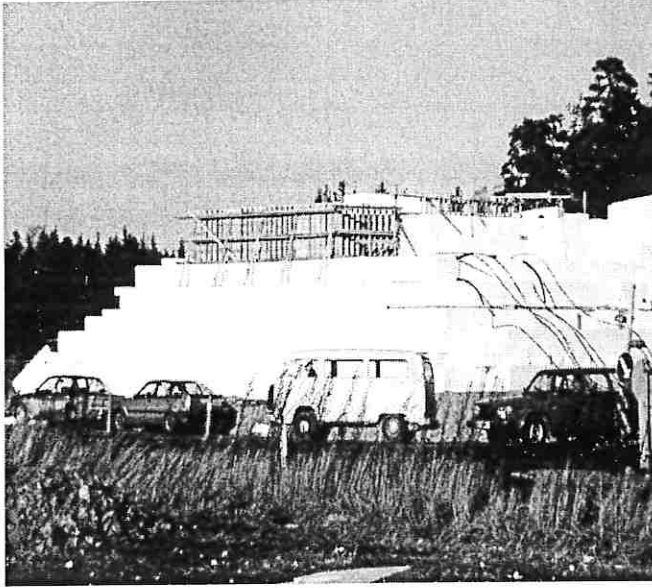


Figur 1. Oversiktskart



Figur 2. Tilløpsfyllinger av EPS

Løkkeberg bru er en enfelts Acrow stålbru med et spenn på 36,8 m som krysser E 6 og betjener sydgående trafikk på Rv 21 fra Halden. Brua ble åpnet i 1989 som en midlertidig løsning for å redusere ulykkesomfanget på det meget farlige enplanskrysset. Den skulle etter planene fjernes i løpet av 3 - 5 år i forbindelse med bygging av ny E 6 forbi Svinesund. Brua er fortsatt i drift 10 år etter fullførelsen og det er først i 1999 oppnådd enighet om linjevalg for kryssing av riksgrensen.



Bru og ramper ble prosjektert i et område med bløte noe forkonsoliderte leiravsetninger hovedsakelig kvikkleire av tykkelse mellom 6 og 16 m.

For å sikre stabiliteten samt unngå uakseptable setninger, ble det på et tidlig tidspunkt bestemt å benytte ekspandert polystyren (EPS) i tilløpsfyllingene. Siden løsningen er midlertidig ville dette også gi oss muligheter til benytte blokkene om igjen i andre prosjekter.

Figur 1. Forskalingsarbeid for brulandkar i EPS fylling

Landkaret var planlagt på peler til fjell. For å dra nytte av EPS materialet som var planlagt i fyllingen ble det vurdert å plassere landkaret direkte på EPS fylling. Beregninger viste at en fundamentering direkte på EPS fyllingen var mulig, dersom blokkene kunne tåle en vertikal belastning på 60 kN/m^2 eksklusiv dynamiske laster.

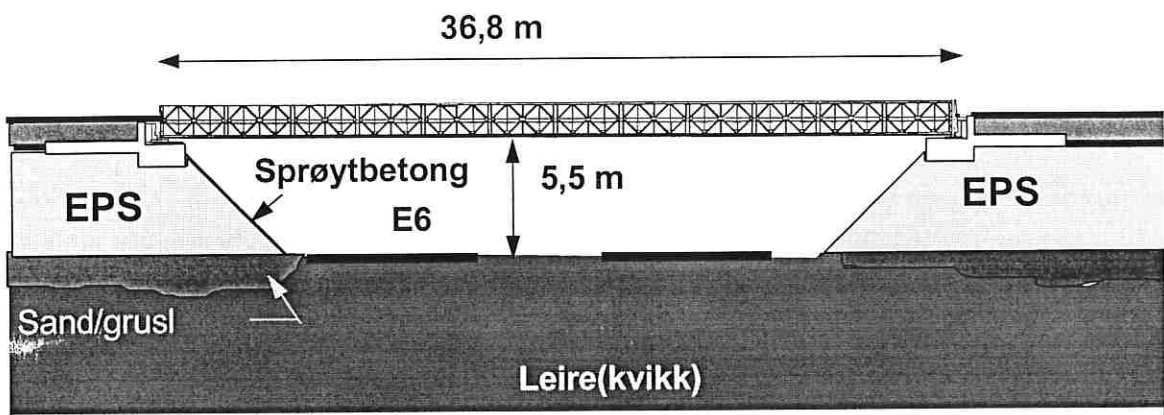


Fig. 4 Lengdeprofil Løkkeberg bru

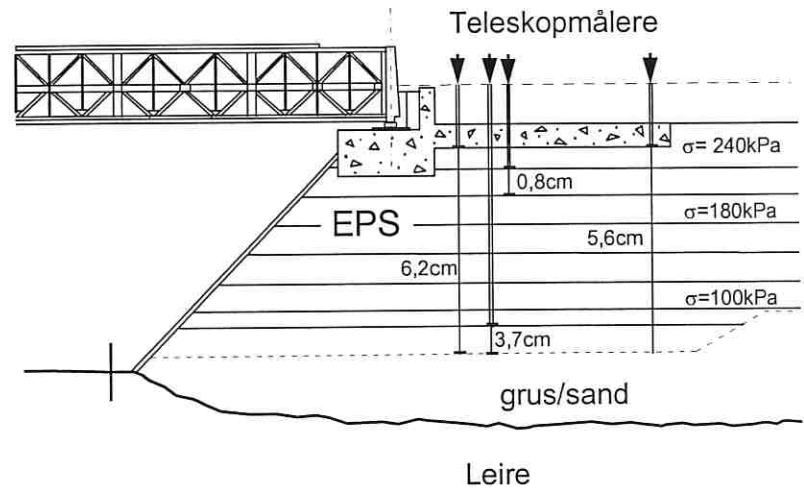
Fyllingshoder av EPS og landkar er dimensjonert og utformet for å oppta både vertikale og horisontale laster inkludert bremsekrefter. Mellom EPS blokkene er det regnet med friksjonskoeffisient $\mu = 0,5$, mens det mellom EPS blokkene og betongfundamentet og EPS blokkene og underliggende grusmasser er benyttet $\mu = 0,7$. Begge brulandkarene er fundamenterert på henholdsvis 4,5 og 5 m høye EPS fyllinger. I det øvre EPS laget under brufundamentet er det

benyttet trykk-styrke på $\sigma = 240 \text{ kPa}$ (40 kg/m^3). I den resterende øvre halvdel av fyllingen er det brukt en trykkstyrke på $\sigma = 180 \text{ kPa}$ (30 kg/m^3), mens det i den nedre halvdel er benyttet vanlig lett fyllings-kvalitet med en trykk-styrke på $\sigma = 100 \text{ kPa/m}^2$ (20 kg/m^3). Denne kvaliteten er også brukt på tilløpsfyllingene. Det er støpt en trykkfordelingsplate i betong (10 cm) over EPS fyllingen og i midten av fyllingen (avretting). Landkarsfundamentets areal er $7,4 \times 7,5 \text{ m}$ med en tykkelse på 100 cm under brulagrene og 50 cm på resten. Brua, som veier 68 tonn, ble heist på plass med en 225 tonns kran ved hjelp av løftebjelker. Sprøytebetong ble sprøytet direkte på fronten av EPS fyllingen (mot E 6), mens det på sideskråningen ble benyttet vanlige jordmasser. Total overbygningstykkelse over landkarsfundamentet er 80 cm.

Instrumentering og oppfølging

Konstruksjonen har gitt oss gode muligheter for oppfølging med forskjellige målinger.

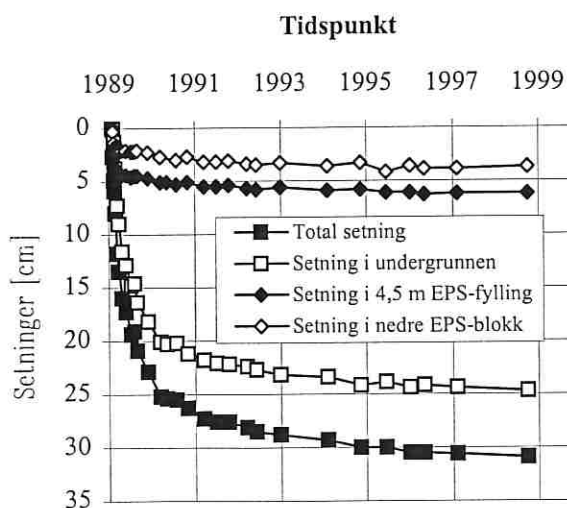
Deformasjoner har blitt målt med teleskopmålere gjennom EPS laget både under anleggsarbeidene og fram til nå 10 år etter. I tillegg er det montert slangesetningsmålere i 2 forskjellige nivåer for å se på deformasjoner i tverrprofil.



Figur 5 Deformasjon i EPS laget

Det er foretatt setnings-observasjoner på 3 steder under fundamentet i lengdeprofil. Disse gir godt samsvar når det gjelder de totale setningene og deformasjon i hele EPS fyllingen.

10 år etter at konstruksjonen ble fullført har det blitt registrert små deformasjoner i hele EPS laget på ca 6 cm (1,3% av EPS fyllingens høyde) se fig 5. Størparten av deformasjonene i EPS laget kom umiddelbart ved pålastning. Krypdeformasjonene for hele fyllingshøyden av EPS er



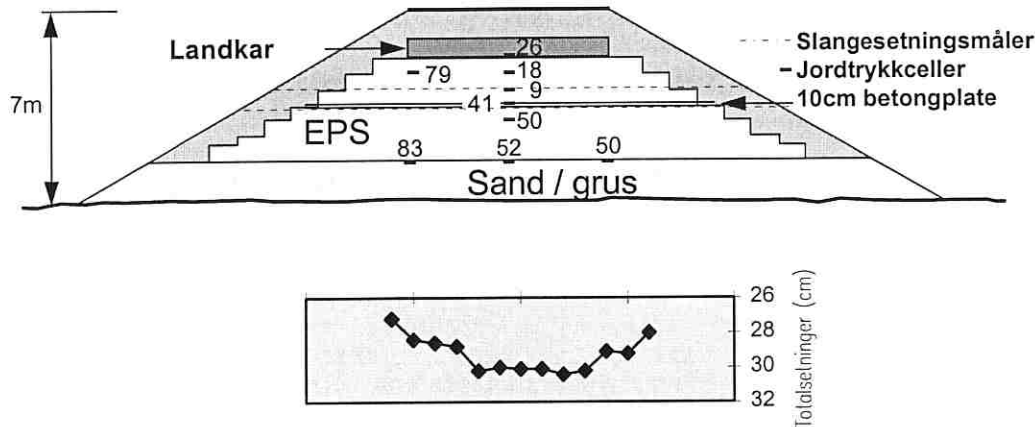
Figur 6. Setninger og deformasjon av EPS i 10 år.

svært liten og langt mindre enn den aktuelle lasten skulle tilsi utifra teoretiske betraktninger av Magnan & Serratrice, fig 11. Omtrent halvparten av den totale deformasjonen 3,7 cm eller 6% deformasjon er målt i den nederste 60 cm blokken med EPS. Denne målte deformasjonen i det nederste EPS laget skulle i henhold til teoretiske betraktninger for EPS materiale tilsi store krypdeformasjoner, noe som ikke er registrert. Tvert imot måles det forholdsvis lite kryp som vist i fig 6.

Totalsetningene (inkludert deformasjonen i EPS blokkene) i bruksperioden var beregnet til totalt 30 cm i brukstiden for

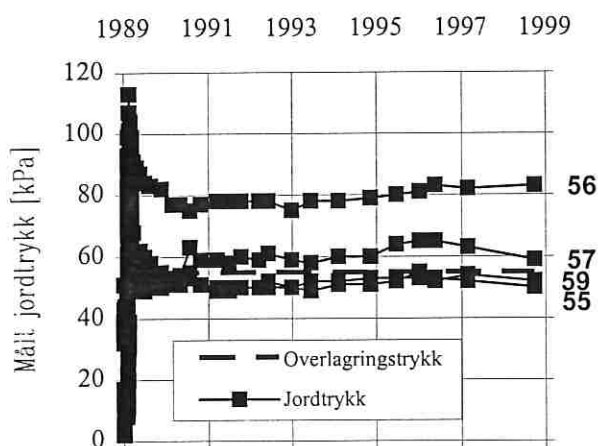
konstruksjonen. Etter 6 år var det registrert setninger i denne størrelsesorden og brua ble jekket opp med 30 cm for å oppnå tilstrekkelig fri høyde med tanke på at brua vil være i bruk i mer enn 5 år til inntil ny Svinesundforbindelse er bygget.

For å studere spenningsfordelingen gjennom EPS fyllingen ble det plassert 7 jordtrykksmålere i forskjellige nivåer i EPS fyllingen og 3 målere i sandlaget under EPS fyllingen. Observasjonene viser at spesielt for de cellene som ligger i EPS fyllingen er det randeffekter (samvirke EPS/jordtrykkceller av stål) som influerer på spenningsresultatene, fig 6.



Figur 7 Spenningsfordeling i EPS fylling, Løkkeberg bru.

Målingene samsvarer bra med overlagingstrykket og de deformasjonene som er målt i EPS fyllingen, spesielt i nedre halvdel. I fig 8 er målingene utført i sandlaget under fyllingen vist



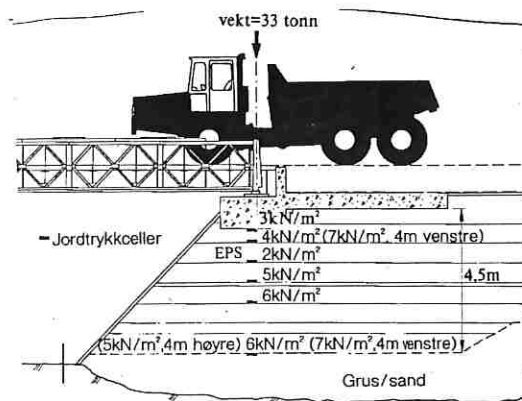
Figur 8. Jordtrykksmålinger over en 10 årsperiode

vegfyllingen hvor de største deformasjoner måles i midten av vegfyllingen.

(celle 55,56 og 57) samt en måling 2 m høyere i EPS laget (celle 59). I øvre halvdel av EPS fyllingen er det målt vesentlig lavere vertikalspenning enn man kunne forventet under midten av landkaret. Derimot viser målinger under hjørnet av landkaret vesentlig høyere spenninger enn man kunne ha forventet.

Både spenningsfordeling og deformasjoner indikerer at vertikalspenningene er redusert i en sone under landkaret. Det er også registrert en reduksjon av spenningene over tid. Dette kan forklares med at setningene i undergrunnen som følge av vertikallasten er størst i midten. Det sees tydelig ved avlesning av slangesetningsmålerne (fig 7) gjennom tverrprofilen av

Å forklare lastkonsentrasjonene under det nederste laget og den dertil store initielle deformasjonen i det nederste laget er vanskeligere. Inntil videre er konklusjonen at det fortsatt er mekanismer i slike fyllinger som ikke er kjente.



Figur 9

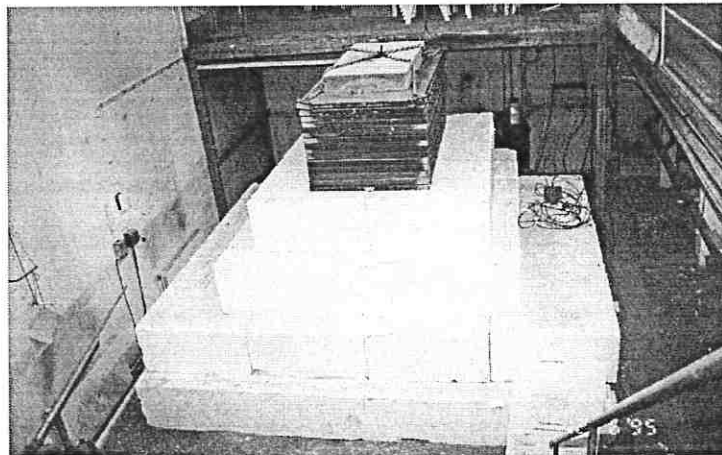
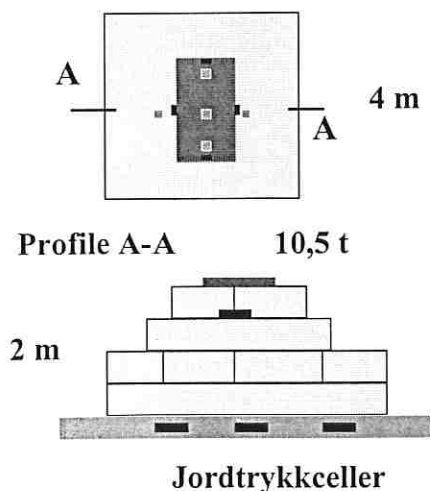
Jordtrykksmålingene har blitt verifisert ved at man i ettertid plasserte fullastet dumper (33tonn) over landkaret. I det tilfellet hvor dumperen står med hele tyngden på fundamentet skulle dette tilsi en spenningsøkning på 6 kPa. Fig 9 viser en god sammenheng med målingene før pålastningen og at vi også her har en tendens til reduserte vertikalspenninger i området under fundamentet.

Det er viktig å understreke at denne brufundamenteringen i en EPS fylling ser ut til å være svært vellykket teknisk sett. 10 år etter åpningen fungerer bru og fylling på en utmerket måte.

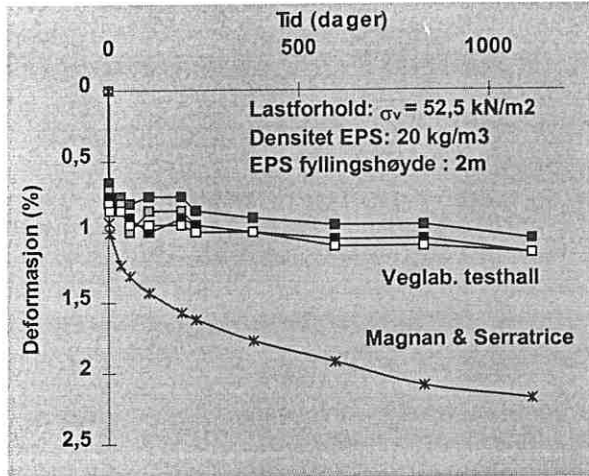
Skalaforsøk - Måling av deformasjon og spenningfordeling i en EPS fylling

Veglaboratoriet gjennomførte i etterhånd av Løkkeberg bru 4 belastningsforsøk i kontrollerte former i forsøkshallen på Vegteknisk avdeling / Vegdirektoratet for bl.a å se på krypdeformasjoner og spenningsfordeling gjennom en EPS fylling under forskjellige belastninger (Intern rapport 1645 fra Veglaboratoriet). De 3 første forsøkene var av relativt kort varighet (inntil 3 måneder) og viste i hovedsak at ved meget store laster (opp i mot 100 kN/m²) fikk man store plastiske deformasjoner i øverste blokk på en 3 m høy fylling i tillegg til at eksentrisitet førte til ytterligere deformasjon. Deformasjonene i resten av fyllingen var vesentlig mindre enn man kunne ha forventet.

I det siste forsøket ble det bygd opp en 2 m høy fylling av blokker med normal størrelse og styrke $\sigma = 100$ kPa i Vegteknisk avdelings forsøkshall. Fyllingen ble instrumentert med jordtrykksmålere og deformasjoner i EPS laget ble observert over en periode på ca 3 år. Generelt utnyttes bare ca 30 % av materialstyrken når det gjelder permanente laster, dvs $q_d < 30$ kPa for blokker av vanlig kvalitet ($\sigma = 100$ kPa). I noen tilfeller har en tillatt høyere



Figur 10. Skalaforsøk



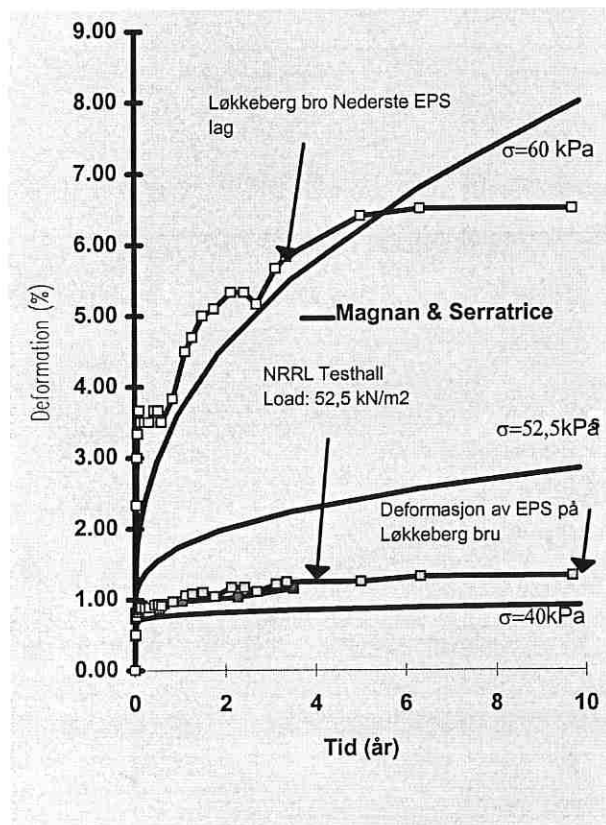
Figur 11. Deformasjoner i EPS målt i et skalaforsøk

EPS-fyllingens utstrekning vil teoretiske betraktninger basert på erfaringer med småprøver (maks $10 \times 10 \times 10$ cm) være lite relevante til å bestemme deformasjoner og kryp.

utnyttelse av materialstyrken relatert til permanente laster. I dette tilfellet ble blokkene belastet med $q = 52,5$ kPa i form av stålplater. Underlaget består av 15 cm sand på et betongdekke og har derfor ingen setnings-forskjeller under fyllingen.

Forsøket har blitt fulgt opp med jevnlig målinger som viser deformasjoner under 50% av beregnede deformasjoner (Magnan & Serratrice) og vesentlig mindre kryphastighet som vist i fig 11.

For en vegkonstruksjon med en viss tykkelse og et fundament som er mindre enn



Figur 12. Sammenligning av skalaforsøk og målinger utført på Løkkeberg

er basert på plastiske deformasjoner over en viss last og tar ikke hensyn til den aktuelle lastspredningen i fyllingen.

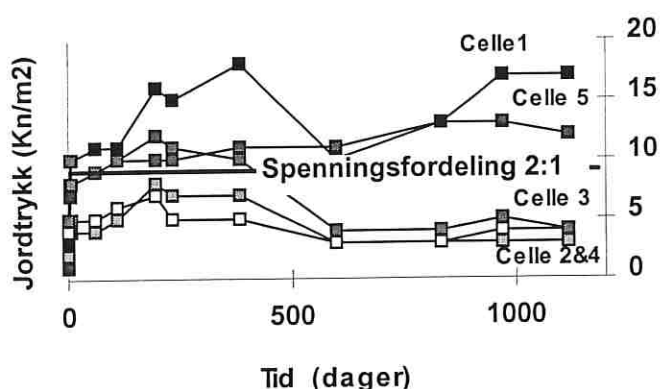
I fig. 12 er det gjort et forsøk på å sammenligne de teoretisk utledete krypkurvene med måleresultater fra Løkkeberg bru og det tidligere beskrevne skalaforsøket med en vertikal belastning på 52,5 kPa på en 2 m fylling av EPS. Figuren viser at det nederste laget i EPS fyllingen har en kryphastighet som ihvertfall de første årene er tilnærmet lik de teoretisk utledete krypkurvene ved samme belastningen, 60 kPa (kfr. et anslått gjennomsnitt av jordtrykk målt under fyllingen på Løkkeberg, fig 7, og 8).

Når det gjelder deformasjon av fyllingens totale høyde viser målingene på Løkkeberg bru (påført last 55 kPa) og skalaforsøket på vegteknisk avdeling (påført last 52,5 kPa) at deformasjonene etter 10 år er mindre enn halparten av de teoretisk utledete kurvene ved samme last, 52,5 kPa.

Erfaringene tilsier at målingene som har blitt utført ligger i et område tett opp under der de plastiske deformasjonen blir dominerende. De teoretisk utledete kurvene

Ut fra spenningsmålinger fra Vegteknisk avdelings forsøkshall og Løkkeberg bru ved bruk av hydrauliske trykkceller fordelt i og under fyllingene, er det gjort forsøk på å vurdere

spenningsfordelingen i EPS-blokker. Spenningsmålinger i sjikt mellom blokkene er selvsagt



Figur 13. Spenningsmålinger utført i et skalaforsøk

utnyttelse av trykkfasthet ser det ut til at det vil være fornuftig å bruke en høyere kvalitet i toppen av fyllingen

En feilkilde ved sammenligningen mellom de skalaforsøket og Løkkeberg bru kan skyldes at underlaget til EPS fyllingen (henholdsvis bløt leire med størst setninger i midten av vegens tverrprofil pga setninger i undergrunnen, fig 7 og et betonggulv) har betydning for de målte deformasjoner og spenningsfordelingen. Setningene i midten av vegens tverrprofil kan medføre spenningskonsentrasjoner/reduksjoner som muligens kan forklare en del av resultatene fra Løkkeberg bru.

Hjelmungen bru

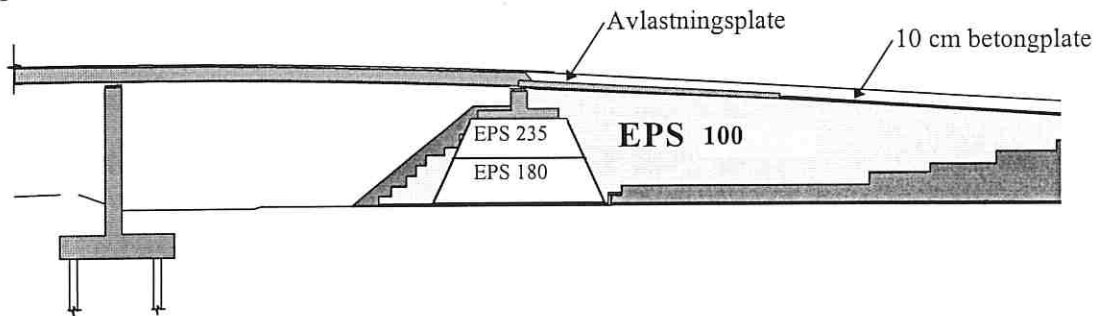
Som beskrevet tidligere viste byggingen av Løkkeberg bru og skalaforsøk utført ved Vegteknisk avdeling at det er mulig å fundamenterer brulandkar direkte på EPS fyllinger. På bakgrunn av dette ble bruk av EPS valgt da Hjelmungen bru måtte refundenteres på grunn av tildels store skader på landkarene.

Hjelmungen bru er en 54 m lang bru over tre spenn som fører en lokalveg over E6 i Østfold. Brua ble bygget i 1992 og den var opprinnelig fundamentert på rammede betongpeler til fast grunn. De 5 m høye tilløpsfyllingene var før refundenteringen dels bygget opp av vanlige fyllmasser og dels av avfallsmasser fra Leca-blokk produksjon med tyngdetetthet $\gamma = 8 \text{ kN/m}^3$. Undergrunnen består av 11 - 14 m med bløt, sensitiv marin leire, delvis kvikk og med høyt vanninnhold.

Ved rutineinspeksjon ble det i 1994 oppdaget skader og deformasjonsmålinger ble startet. Disse viste at brulandkarene hadde forskjøvet seg og påført brua skade. Setninger i undergrunnen syntes å være årsaken. Før reparasjonsarbeidene startet var setninger av størrelsesorden 600 mm målt og setningshastigheten ble like før ombyggningsarbeidene startet målt til 100 mm/år, uten avtagende tendens. Størrelsen av setningene var langt over det som var beregningsmessig forventet og skyldes delvis at tilløpsfyllingene var tyngre enn forutsatt og delvis en overvurdering av forkonsoliderings-effekten i de øvre leirlagene.

vanskelig og måleresultatene varierer også ganske mye. I hovedsak er imidlertid målte spenninger ganske lave og indikerer at omhylningskurven for spenningsboblen kan ligge innenfor en helning på 2:1 målt fra ytterkant av belastningsarealet. Avhengig av lastplatens stivhet og mulig lasteksentrisitet kan det imidlertid oppstå lokale spenningskonsentrasjoner. For å oppnå størst mulig

Setningsutviklingen viste at raske reparasjonstiltak var nødvendig. Siden setninger forårsaket av tilløpsfyllingene var hovedproblemet, ble det besluttet å redusere lasten på undergrunnen med 30 - 40 kPa for å gjenopprette den tidligere spenningstilstanden i leirmassene. Dette omfattet utskifting av tilløpsfyllingene med EPS-blokker samt refundering av landkarene på såle direkte på EPS-fyllingene. Løsningen er vist på figur 14.



Figur 14 Prinsippskisse for refundering av Hjelmingen bru

Reparasjonsarbeidene startet i desember 1995 og var avsluttet våren 1996. Ett landkar ble refunderert av gangen mens brudekket ble gitt alternativ understøttelse som vist på bildet, figur 15



Figur 15 Oppbygging av EPS-fyllinger. Brua bæres av midlertidige understøttelser.

Tykkelse og tyngdetetthet i fyllmassene som ble fjernet ble registrert for å kunne ha sikrere data for last og deformasjonsberegninger. Etter at de opprinnelige landkarene var fjernet ble betongpelene innsisert for mulig skade før de ble kappet i terrengnivå.

Ved oppbyggingen av tilløpsfyllingene ble det benyttet EPS med tre forskjellige trykkestyrker. I sonen direkte under brulandkaret innenfor det markerte området vist på figur 14 ble det benyttet materiale med en trykkestyrke på $\sigma = 235 \text{ kN/m}^2$ i de tre første lagene. Videre ned ble det benyttet en kvalitet på $\sigma = 180 \text{ kN/m}^2$ innenfor sonen. I resten av EPS-fyllingen ble det anvendt materiale med normal kvalitet $\sigma = 100 \text{ kN/m}^2$. Kravet til trykkestyrke ble fastsatt ut fra en vurdering av antatt spenningsfordeling i fyllingen og ønsket om å holde spenninger forårsaket av permanent last under 30 % av materialstyrken. Strengere geometriske krav enn

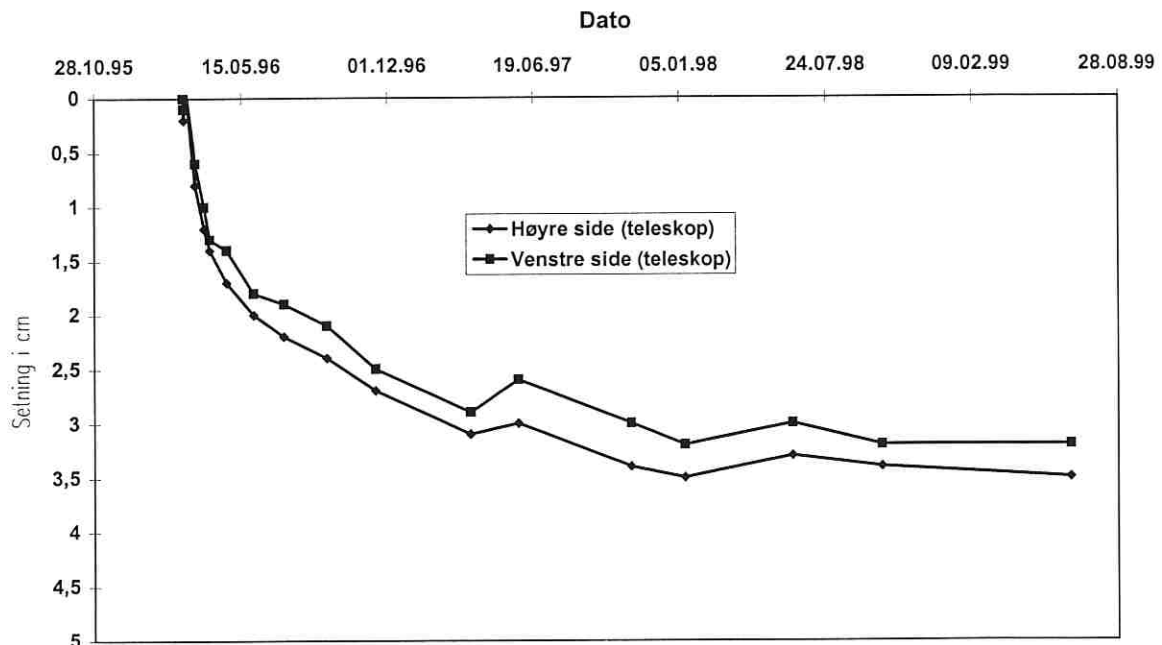
vanlig ble benyttet for å oppnå en så jevn fylling som mulig for dermed og redusere initialdeformasjonene når reaksjonskraften fra brudekket ble overført til det nye landkaret.

Bak begge landkar ble det støpt en 10 m lang 200 mm tykk friksjonsplate for opptak av horisontalkrefter på landkarene. Over de øvrige deler av EPS-fyllingene ble det støpt en vanlig betongplate med 100 mm tykkelse. Over betongplatene ble det lagt vegoverbygning med tykkelse 400 mm.

For å overvåke effekten av ombyggingarbeidene ble det installert utstyr for registrering av setninger og jordtrykk. Setninger er registrert med slangesetningsmålere plassert i sandputa under nederste EPS-lag, nivellementsplanter på topp veg samt at det ble montert to teleskopstenger for måling av både totalsetninger og setninger i EPS-laget.

Setninger og jordtrykk er nå fulgt opp i 3,5 år. Totalsetningene for landkaret i akse 1 ligger i størrelsesorden 2 - 4 cm. I akse 4 er det registrert inntil 8 cm setninger. Årsaken til dette skyldes antagelig at det ved en feil ble lagt ut 0,5m EPS for lite i forhold til det som var prosjektert.

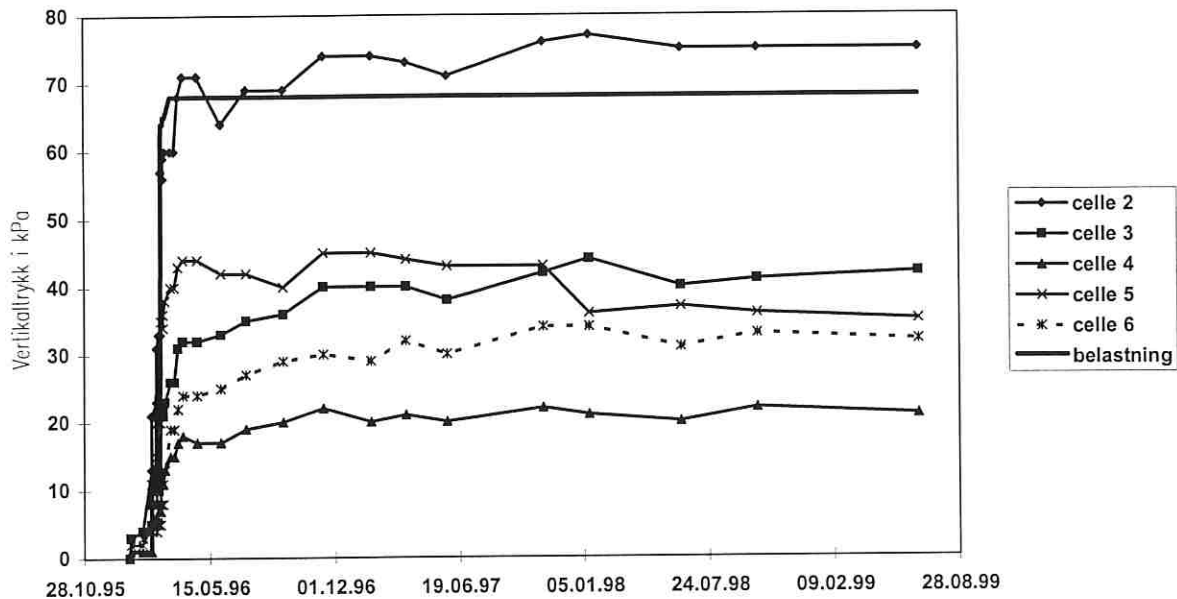
Ved hjelp av teleskopstenger er det registrert i underkant av 3,5 cm deformasjoner i EPS fyllingen, dette tilsvarer 0,7% av fyllingshøyden. Registrerte deformasjoner i EPS fyllingen er vist på figur 16.



Figur 16 Registrerte deformasjoner i 5m EPS

Målte spenninger under EPS-fyllingen viser en høyere spenningskonsentrasjon i midten (celle 2) enn mot sidene som vist i figur 17. Beregnet last på landkaret er vist med tykk strek i diagrammet. Problemer med å løfte bruplaten fri fra det gamle landkaret kan imidlertid indikere at reaksjonskraften fra landkaret kan være noe større enn beregningene skulle tilsi. Det var forventet at en omfordeling av kreftene på sikt ville medføre at spennings-

konsentrasjonen under midten av landkaret ville avta. Imidlertid viser målingene at så ikke har skjedd. Dette indikerer mindre lastspredning i EPS-materialet enn det som kunne forventes ut fra tidligere laboratorie- og fullskalaforsøk.



Figur 17. Registrerte vertikalspenninger

Til tross for at påløpte setninger er noe større enn det som var forventet synes bruk av EPS for å reparere brua å ha vært vellykket. Reparasjonsarbeidene var relativt enkle å utføre.

Deformasjoner i EPS fyllingen ligger innenfor det som var forventet, 0,7 % av fyllingshøyden som samsvarer godt med tidligere utførte forsøk og fullskalamålinger. Imidlertid er lastspredningen i EPS-materialet mindre enn det en tidligere har antatt.

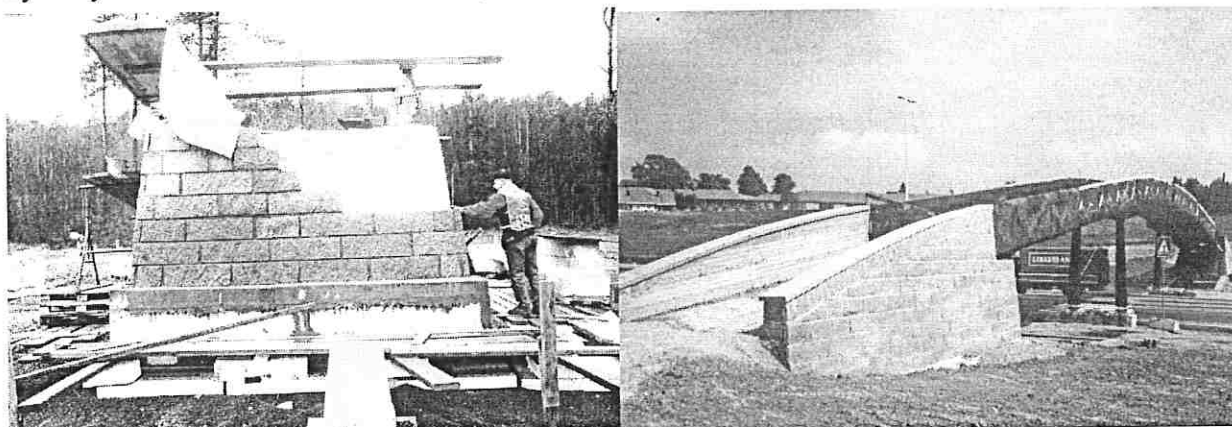
Fundamenter for forgjengerbru

Oppgradering av nordre innfartsåre til Fredrikstad omfatter flere nye overgangsbruer. Tre slike forgjengerbruer har kontinuerlige bæresystemer av laminert tre.

Grunnforholdene i området består av meget bløt, marin leire delvis kvikk. Under leira finnes faste, granulære løsmasser over fjell. Leirlaget varierer i tykkelse over området fra typisk 10 - 50 m og er meget setningsømfintlig. Vedvarende terrengsetninger med setningshastighet på 10 - 20 mm pr. år er registrert.

Med foreliggende reaksjonskrefter fra søylene var det ikke mulig å anvende sålefundamenter i leira. Pelefundamenter ble derfor valgt her. For å unngå store setninger ved landkarene ble det valgt å benytte EPS-blokker i tiløpsfyllingene for to av trebruen. Det ble også besluttet å fundamentere landkarene direkte på EPS-fyllingene, figur 18.

For å oppta reaksjonskreftene fra bruplate ble det valgt å benytte EPS-blokker med trykkstyrke $\sigma = 150 \text{ kN/m}^2$. Totalhøyden av EPS-fyllingen er 3 m med tre lag av 1 m tykke



Figur 18 Rolvsøyvegen. Gangbruer fundamentert på EPS

blokker. Den nederste blokken er plassert under terrengnivå for å oppnå en kompensert fundamentering. For å beskytte EPS-blokkene er det benyttet en ytre kledning av granittblokker på sideskråningene som har en helning 10:1. EPS-blokkene ble levert fra produsenten med denne helningen. Over den øverste EPS-blokken er det støpt en betongplate med sidevanger. Granittblokkene gir ellers landkarene et estetisk fordelaktig utseende.

Bruene ble åpnet for trafikk i oktober 1996. Setningsutviklingen ved landkarene vil bli fulgt opp over tid, og justeringsmuligheter er lagt inn ved søylene for å unngå for stor differensialsetninger langs bruaksen hvis behov for tiltak skulle oppstå.