Effekten af geonet i det ubundne bærelag på blød bund

Kandidatspeciale
Veje og trafik

Anne Richter Jungersen
Johan Poulsgaard

Aalborg Universitet
BUILD - Institut for Byggeri, By og Miljø

AALBORG UNIVERSITET
STUDENTERRAPPORT

Det Ingeniør- og Naturvidenskabelige fakultet
Institut for Byggeri, By og Miljø
Thomas Manns Vej 23
9220 Aalborg Øst
https://www.build.aau.dk/

Titel:

Effekten af geonet i det ubundne bærelag på blød bund

Projekt:

Kandidatspeciale

Projektperiode:

1. februar 2023 - 9. juni 2023

Uarbejdet af:

Anne Richter Jungersen
Johan Poulsgaard

Vejleder:

Lars Bo Ibsen

Samarbejdspartnere:

COWI Fonden
BG Byggros A/S

Sidetal:

Rapport: 83
Appendiks: 30

Synopsis:

Kandidatspecialet undersøger effekten ved indlæggelse af geonet i det ubundne bærelag, stabilt grus, og den potentielle materialebesparelse. Baggrunden for projektet er risiko for råstofmangel, hvilket vil øge transportafstand fra grusgrav til anlægsprojekt.

Undersøgelsen udføres som et fuldskalaforsøg med indendørs testfaciliteter, hvor opbygninger med to forskellige geonet testes på to forskellige blød bunde. Geonet testes udlagt under 200 mm stabilt grus, hvor der udføres statisk og cyklisk pladebelastning. Der suppleres med statisk pladebelastning på opbygninger med 250 og 300 mm stabilt grus.

Databehandlingen afslører en øget stivhed i opbygningerne med geonet på 28-58%. Her viser forsøgsresultaterne, at det triaksiale geonet opnår en større styrkeforøgelse end det biaksiale. Resultaterne fra cykliske pladebelastning viser en armeringseffekt på ca. 4. Ud fra forsøgsresultaterne opstilles lineære sammenhænge mellem lagtykkelsen af det ubundne bærelag og stivheden, som anvendes til videre beregninger.

Det erfaret krav om, indlægges af mindst 200 mm stabilt grus oven på geonettet stiller spørgsmål ved udledningen af CO_2e og det økonomiske aspekt. Beregningerne om udledningen af CO_2e viser, der opnås en reducering i antallet af CO_2e med 0-17%. De økonomiske beregninger viser en fordel i en ud af fire beregninger, hvor omkostningerne øges med 3-17%.

Konklusionen er, at der ved indlæggelse af geonet opnås en styrkeforøgelse. Dette giver anledning til en reducering af det ubundne bærelag på blød bund med en styrke på 1,4 og 7,5 MPa. Ved fremtidige studier bør der undersøges for blød bund med styrker op til 40 MPa. Derudover kan der med fordel udføres forsøg for at be- eller afkræfte teorien om en lineær sammenhæng mellem E-modul og lagtykkelse.

Forord

Dette kandidatspeciale er udarbejdet på 10. semester på uddannelsen Veje & Trafik, Aalborg Universitet af Anne Richter Jungersen og Johan Poulsgaard. Specialet er udarbejdet i perioden fra februar til juni 2023.

Kandidatspecialet undersøger effekten ved indlæggelse af geonet i det ubundne bærelag, stabilt grus på blød bund, og om der er en mulige materialebesparelse ved at indlægge geonet. Yderligere undersøges forskellen i økonomi og udledning af CO_2e ved anvendelse af geonet. Kandidatspecialet er muliggjort med støtte fra COWI Fonden, som har gjort det muligt, at indkøbe materialer og laborant timer. Geonet, der er anvendt til specialet, er bevilget af BG Byggros A/S.

Tak til samarbejdspartnere hos Byggros, Anders Kjeld og Peter Randrup Nilsson, som har hjulpet med vejledning og erfaringer om anvendelse af geonet. Derudover rettes der tak til samarbejdspartnere fra COWI, Michael Rosenlund Lodahl fra afdeling Transport Infrastructure samt Gregers Hildebrand og Mantas Hesthaven fra afdeling Roads, Airports and Digitalisation, der har stillet ressourcer til rådighed med udveksling af erfaringer og vejledning til specialet. Tak til respondenter fra Vejdirektoratet, som har medvirket til interview. Til sidst gives et tak for vejledning undervejs i projektperioden til hovedvejleder og professor Lars Bo Ibsen og ph.d. studerende Daniel Kristian Andreassen.

Læsevejledning

Kildehenvisning og litteraturliste tager udgangspunkt i Harvard-metoden, der nærmere er beskrevet af Nielsen (2015) som Navne-år metoden. Hvis kilden refererer til hele afsnit, sætninger eller værdier anvendes denne som *(forfatter, år)*, og hvis kilden anvendes aktivt i formuleringer angives denne som *forfatter (år)*. Anvendt litteratur er uddybet afslutningsvist i rapporten i alfabetisk rækkefølge sorteret efter forfatter og udgivelsesår. Afsnit, tabeller og figurer refereres ved kapitelnummer efterfulgt af den numeriske rækkefølge, som elementet er indsat. Første figur i kapitel 1 vil derved navngives Figur 1.1, mens tredje tabel i kapitel 4 er navngivet Tabel 4.3.

Abstract

This master thesis examines the benefits of having geogrids in the subbase of paving constructions with soft soil conditions. The main objective is to enhance sustainability and reduce the use of materials through the incorporation of geogrid reinforcement. The study aims to increase knowledge about triaxial and biaxial geogrids and determine the optimal approach based on full-scale tests in laboratory and relevant literature.

The road construction industry currently faces challenges, because of scarce resources due to depleted gravel pits, which leads to increased transportation distances for gravel materials, subsequent rises in CO_2e and project costs. Therefore, this master thesis investigates the possibility of saving materials using geogrids while maintaining bearing capacity. The investigation has been carried out though a literature study, insights and experience from Vejdirektoratet, the company Byggros, full-scale tets, and data analysis.

Existing literature is indicating that geogrids strengthen road constructions and therefore allowing for a reduction in the use of base course materials. The literature study has used similar experimental setup to this thesis. This is performed using a full-scale test box on soft soil, exposed to the cyclic load of a hydraulic actuator.

The collected data from the full-scale test in the laboratory shows a strength increase of 28-58 percent of the Young's modulus. Additionally, the collected data demonstrate that the triaxial geogrid achieves greater stiffness than the biaxial geogrid. The cyclic plate load test revealed a reinforcement factor of 4 when incorporating geogrids into the road construction. The data is used to plot a linear model which can predict strength increase per mm gravel on top of the geogrid. The model indicates a strength increase of 0,07-0,09 MPa per mm gravel. Furthermore, the results, literature study, and recommendations support a minimum coating thickness of 200 mm to achieve a strength increase.

The manufacturing company of geonet Byggros has design diagrams for recommending base layer reduction. These recommendations are confirmed by the linear models conducted in this study, by the tested subgrade strengths of 1,4 and 7,5 MPa. Therefore, the design manuals serve as a useful starting point for determining the coating thickness required to reduce the base layer.

The increase in strength accomplished by the integration of geogrids leads to a reduced coating thickness. The environmental and economic benefits in terms of CO_2e has been investigated in that relation. The outcome indicates that incorporating geogrids increases costs by 3-17 percent. However, in the case of a 1,4 MPa subgrade, the use of geogrids reduces the gravel layer by 80 mm and by that becomes cheaper. Considering CO_2e using geogrids and reducing layer thickness results in savings of 0-17 percent. In particular, for a subbase with the strength of 7,5 MPa the use of biaksial geogrids, the limited reduction of 60 mm gravel and the relatively high emissions associated with manufacturing this becomes less beneficial.

This master thesis has investigated and demonstrated, that a reduction of the base layer and savings in raw material is plausible by the usage of geogrids. The triaxial geogrid reduce the discharge of CO_2e emission more than the biaksial geogrid. Furthermore, is has been proven that it is not necessarily an economical extra cost, and the CO_2e can be reduced by incorporating geogrid in the soft soil conditions of road construction.

Indholdsfortegnelse

1 Indledning 1

1.1 Projektbeskrivelse 3

1.2 Undersøgelsesspørgsmål 3

1.3 Problemafgrænsning 4

2 Metode 5

2.1 Interview med Vejdirektoratet 6

2.2 Samtale Byggros 6

2.3 Spørgsmål til relevante aktører 7

2.4 Litteratursøgning 7

2.5 Forsøgsudførelse 10

3 Litteraturstudie 13

3.1 Ph.d. - forudsætninger for anvendelse af geonet 13

3.2 Fuldskalaforsøg på blød bund 14

3.3 Tre triaksiale geonet på blød bund 16

3.4 Komplet vejopbygning med geonet 20

3.5 To triaksiale geonet testet på blød bund 24

3.6 Erfaring med reducering af grusbærelag 25

3.7 Vejregler national og international 25

3.8 National litteratur 26

3.9 Studenterprojekter 27

3.10 Opsummering på litteraturstudiet 28

4 Vejdirektoratets erfaring med geonet 30

4.1 Svar fra Byggros 31

5 Geonet ifølge Byggros 32

5.1 Betydning af geonettes udformning 33

5.2 Anbefaling til indlæggelse 33

6 Materialeparametre 35

6.1 Ekspanderet polyesteren . . . 35
6.2 Stabilt grus . . . 36
6.3 Komprimering . . . 37
6.4 Anvendte geonet . . . 37

7 Forsøgsbeskrivelse . . . 41

7.1 Forsøg med underbund EPS 60 . . . 43
7.2 Forsøg på underbund af EPS 250 . . . 47
7.3 Fejlkilder . . . 51

8 Forsøgsresultater . . . 52

8.1 Statisk pladebelastning . . . 52
8.2 Cykliske pladebelastning . . . 53
8.3 Armeringseffekt . . . 55

9 Databehandling . . . 57

9.1 Lineære tendenslinjer for styrkeforøgelsen . . . 61

10 Dimensionering af vejbefæstelse i MMOPP . . . 63

10.1 MMOPP dimensionering af det ubundet bærelag . . . 63

11 Økonomi og udledning af CO_2e . . . 65

11.1 Økonomisk vurdering ved geonet . . . 66
11.2 CO_2e udledning ved brug af geonet . . . 66
11.3 Resultatsammenfatning . . . 68

12 Diskussion . . . 70

12.1 Statisk og cyklisk belastning . . . 70
12.2 Mængden af stabilt grus . . . 71
12.3 Styrkeforøgelse afhænger af belastning . . . 71
12.4 Placering af geonet . . . 71
12.5 Byggros anbefalinger og forsøgsresultater . . . 72
12.6 Grusfraktioner i geonet . . . 72
12.7 Vejreglers anbefaling . . . 73
12.8 Forsøgsresultater . . . 74

12.9 Branchens holdning til geonet . . . 75
12.10 FN's verdensmål . . . 76
12.11 Bidrag til klimamål og yderligere potentiale . . . 77
13 Konklusion . . . 78
13.1 Perspektivering . . . 79

Appendiks

A Dokumentation af stabilt grus . . . 85
B Komprimeringskontrol . . . 87
C Statisk pladebelastning . . . 88
C.1 Forsøgsoversigt . . . 88
C.2 EPS 60 - Forsøg på ren underbund . . . 89
C.3 EPS 60 - Kontrolforsøg 1 på stabilt grus . . . 90
C.4 EPS 60 - Forsøg på biaksial geonet og stabilt grus . . . 91
C.5 EPS 60 - Forsøg på triaksial geonet og stabilt grus . . . 92
C.6 EPS 250 - Forsøg på ren underbund . . . 93
C.7 EPS 250 - Kontrolforsøg 1 på stabilt grus . . . 94
C.8 EPS 250 - Forsøg på biaksial geonet og stabilt grus . . . 95
C.9 EPS 250 - Forsøg på triaksial geonet og stabilt grus . . . 96
C.10 EPS 60 - Reducering af stabilt grus ved triaksial geonet . . . 97
C.11 EPS 60 - Kontrolforsøg 2 på stabilt grus . . . 98
C.12 EPS 250 - Kontrolforsøg 2 på stabilt grus . . . 99
C.13 EPS 60 - Kontrolforsøg 3 på stabilt grus . . . 100
C.14 EPS 250 - Kontrolforsøg 3 på stabilt grus . . . 101
D Cyklisk pladebelastning . . . 102
D.1 Forsøgsoversigt . . . 102
D.2 Hver enkelt belastningscyklus . . . 103
D.3 Cyklisk pladebelastning på EPS 60 med 12 kN . . . 104
D.4 Cyklisk pladebelastning på EPS 250 med 30 kN . . . 105

E MMOPP 106

E.1 Analytisk dimensionering 106

E.2 Planum 107

E.3 MMOPP-beregninger 108

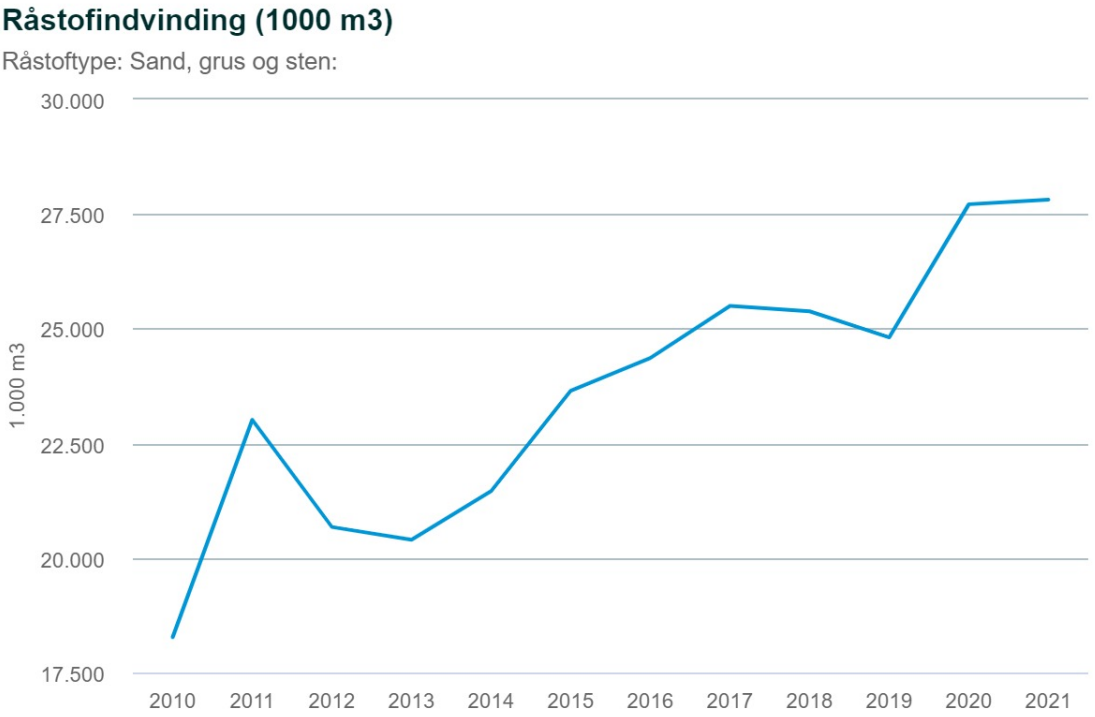
F CO_2-aftryk ved indlæggelse af geonet 112

G Sammenligning med Byggros designdiagrammer 113

1 Indledning

Råstoffer er nødvendige for samfundet udvikling. Nogen af de vigtigste råstoffer som indvindes på land i Danmark er sand, grus, ler, sten og tørv. Råstoffer findes i normalt i de øverste lag af undergrunden. De steder hvor naturen selv har sorteret kornstørrelserne ud, er steder hvor det kan betale sig at indvinde råstoffer. Det er ofte i smeltevandaflejringer der findes sand, grus og sten. Råstoffer kan både indvindes på land og i havet, indvinding sker med hensyntagen til natur og miljø. Råstoffer anvendes især til bygge- og anlægsprocesser, hvor sand, grus og sten blandt andet til vejanlæg og fremstilling af asfalt. Et estimat i antallet af råstoffer, som anvendes til anlægsprojekter er 70% imens 30% anvendes til Byggeriet. (Miljøstyrelsen, 2022)

Udfordringen med naturressourcer er, at de ikke er ubegrænset. Samtidig er indvinding af råstofferne sand, grus og sten på land stigende, hvilket fremgår af figur 1.1.

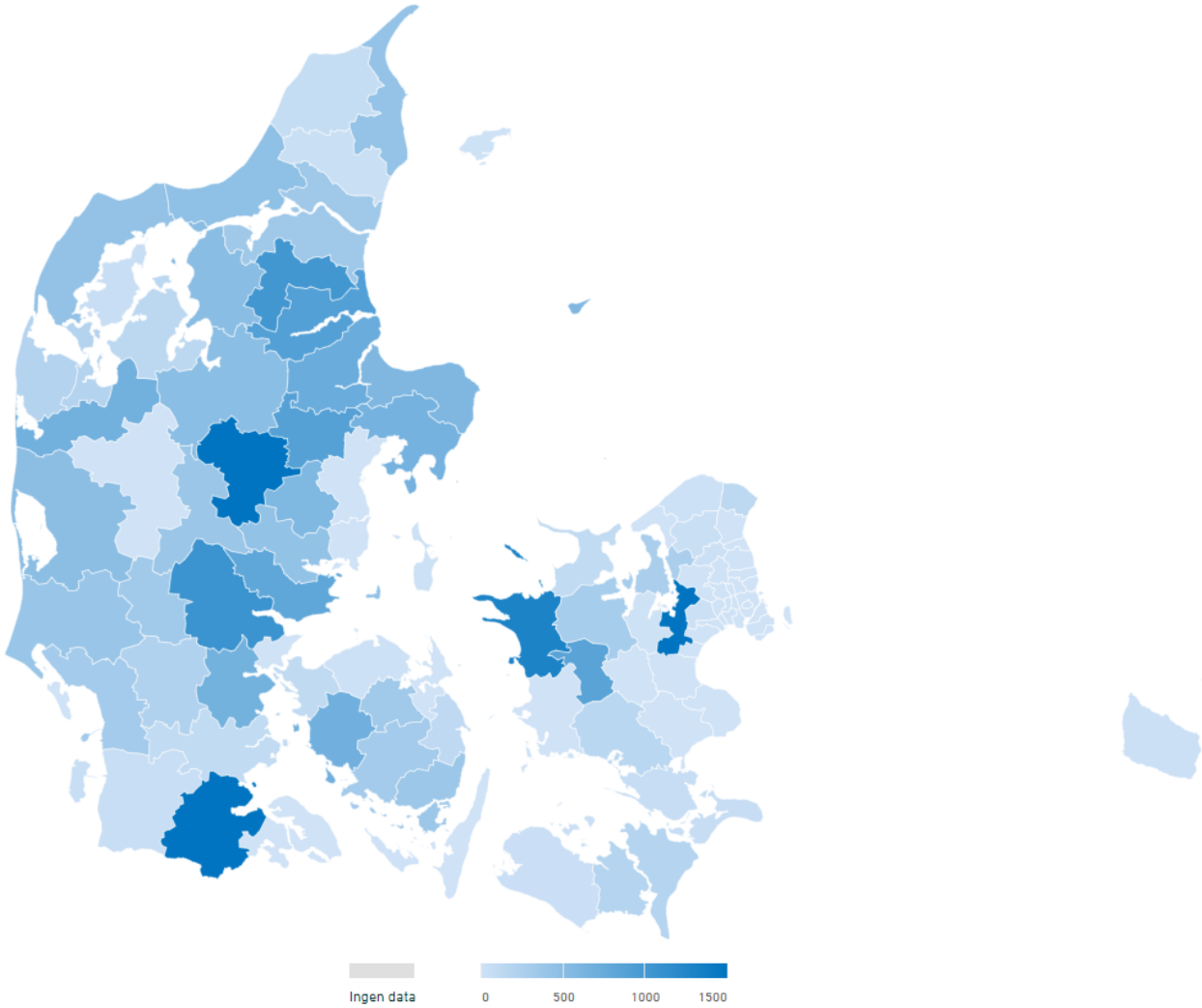


Figur 1.1: Udvikling i indvinding af sand, grus og sten på land (Danmarks Statistik, 2023, RST01).

Det er ifølge Teknologisk Instituts publikation vigtigt, at der er effektiv styrring af måden ressourcerne anvendes på og specielt dem, som ender som affald under nedrivning eller renovering. Genbrug kan ikke erstatte, men reducere indvinding af nye råstoffer. Det forventes, at råstofindvindingen på sigt vil blive sværere grundet kamp om arealanvendelse. (Smith og Andersen, 2020)

Råstoffer bliver primært afsat lokalt og normalt med en maksimal afstand på 100 km, grundet de tunge og store mængder der ofte anvendes til anlægsprojekter. Derfor er prisen på transport af materialerne af stor betydning. Erfaringer siger, at det koster 1 kr. pr. ton pr. kørt km, og i storbyer er det som regel endnu højere. Derfor er det ikke urealistisk, at der kan opstå lokale råstofkriser og allerede nu opleves det, at det er sværere at skaffe råstoffer i Østdanmark end Vestdanmark (Smith

og Andersen, 2020). Blandt det indvundet sand, grus og sten på land, blev 69% i 2021 indvundet i Jylland, hvilket er fremgår af figur 1.2.



Figur 1.2: Råstofindvinding af sand, grus og sten på land i 2021 på kommuneniveau i enheden 1.000 m^3 (Danmarks Statistik, 2023, RST01).

Kvaliteten af råstoffer er forskellige, derfor kan en bestemt kvalitet af råstoffer blive en mangelvare. Danmark er stort set selvforsynende med råvarer. Der importeres normaltvis kun granitskærver fra Norge til anvendelse i slidlag og beton. Importen er stigende, og fra år 2006 til 2016, udgjorde importen af råstoffer 10% af den samlet anvendelse. Import og øget transportlængde giver en stigning i blandt andet CO_2-udledning. En grov beregning lavet af Teknologisk Institut viser, at 1 ton råstof pr. kørt km udleder omkring 80 g CO_2-ækvivalenter, CO_2e. (Smith og Andersen, 2020)

Risikoen for råstofmangel er en bekymring der spreder sig, blandt andet i virksomheden NCC, som i januar 2023 har skrevet et brev til Folketingets Miljøudvalg. Dette er til trods for, at flere kommuner og borgere protesterer mod råstofindvinding fra blandt andet Øresund og Køge Bugt. Dette er en nødvendighed for at NCC kan bidrage til levering af råstoffer til letbane og fjernevarme, da råstoffer forventes at blive en mangelvare og specielt i hovedstadsområdet. Dette vil ifølge NCC udføre en øget CO_2-udledning og fordyre blandt andet politisk besluttet udviklingsprojekter i hovedstadsområdet, hvis der ikke indvindes råstoffer i nærområdet. (Bjerring, 2023)

Region Midtjylland sendte en pressemeddelelse ud i efteråret 2022, hvor formand for udvalget for regional udvikling i Region Midtjylland udtalte;

Vi har et rimeligt godt overblik over, hvad vi har af råstoffer, og det er derfor vi siger; Vi skal tænke os om, hvis ressourcerne ikke skal være sluppet op om 50 år. (Nordjyske, 2022)

Dette er et incitament for at undersøge, hvordan der kan spares eller reduceres på mængden af råstoffer. Den største besparelse, skal komme fra anlægsbranchen, da 70% af de indvundne råstoffer anvendes hertil, hvorfor der er et stort fokus på at der skal gøres noget, men løsningen er endnu ikke fundet.

Den 21. juni blev der i Folketinget vedtaget en Infrastrukturplan, som en investeringsplan for transportområdet på 161 mia. kr., denne plan gælder for perioden 2022-2035. (Folketinget, 2021) Der er lagt op til store anlægsprojekter, som kræver store mængder råstoffer og ressourcer til anlægsbranchen, som ikke giver anledning til en besparelse. Derfor er det nødvendigt, at finde alternative materialer eller reducere mængden af råstoffer i anlægsprojekter.

1.1 Projektbeskrivelse

I dette speciale undersøges det, om indlæggelse af geonet, af plastiktypen polypropylen, kan øge styrken af det ubundne bærelag med stabilt grus. Denne styrkeforøgelse kan give anledning til at reducere lagtykkelsen af stabilt grus i en vejopbygning og derved kan mængden af stabilt grus under anlægsprojekter reduceres. Geonet anvendes sjældent i vejopbygninger i Danmark og normalvis på strækninger med blød bund. Det er sjældent anvendt til at styrke stivheden af det ubundne bærelaget for at kunne reducere lagtykkelsen. Derfor vil dette speciale belyse potentialet for at reducere det ubundne bærelag i vejopbygningen. Dette skal undersøges ved et litteraturstudie, laboratorieforsøg og ud fra en betragtning af økonomi og udledning af CO_2e ved implementering af henholdsvis et biaksial og et triaksial geonet. Laboratorieforsøg testet i en fuldskala forsøgsopbygning med en simuleret blød bund og stabilt grus. Dette leder til følgende undersøgelsesspørgsmål:

1.2 Undersøgelsesspørgsmål

- *Hvor stor en bæreevneforøgelse kan der opnås ved implementering af geonet af polypropylen på blød bund?*
- *Hvad er forskellen i bæreevneforøgelsen ved henholdsvis et biaksial geonet og et triaksial geonet?*
- *Hvor meget kan geonet reducere lagtykkelsen af grusmaterialer i vejens ubundne bærelag på blød bund?*
- *Hvordan kan reduceringen ske uden at gå på kompromis med vejens bæreevne og dermed vejens levetid?*
- *Hvordan påvirker implementeringen af geonet vejens anlægsomkostninger og udledning af CO_2e?*

Hovedformålet med dette kandidatspeciale er, at undersøge muligheden for at reducere brugen af grusmaterialer i vejopbygningen, herunder fokus på stabilt grus. Det er hensigten, at undersøge forskellen i styrken af biaksial og triaksial geonet af plastiktypen polypropylen, herunder hvordan der opnås de bedste resultater baseret på et fuldskala laboratorieforsøg og ud fra den tilgængelige litteratur på området. Fuldskalaforsøget vil danne grundlag for udvikling af en sammenhæng, der tager højde for en forøget styrke og stivheden grundet geonet implementeret i vejopbygningens ubundne bærelag. Yderligere vil der udføres CO_2e beregninger ved implementering af geonet

sammenlignet med et ubundet bærelag dimensioneret i MMOPP. Yderligere vil de økonomiske aspekter indgå i vurderingen.

Fuldskalaforsøg indebærer, at teste effekten af geonet af polypropylen placeret i det ubundne lag med stabilt grus. Ydermere undersøges forskellen mellem geonet der overfører kræfter via en biaksial og triaksial struktur. Forsøgene bliver testet på simuleret blød bund, som er ekspanderet polystyren med et opgivet elasticitetsmodul, E-modul, på henholdsvis 2 og 7,5 MPa. Forsøgene vil blive testet med statisk og cyklisk pladebelastning.

1.3 Problemafgrænsning

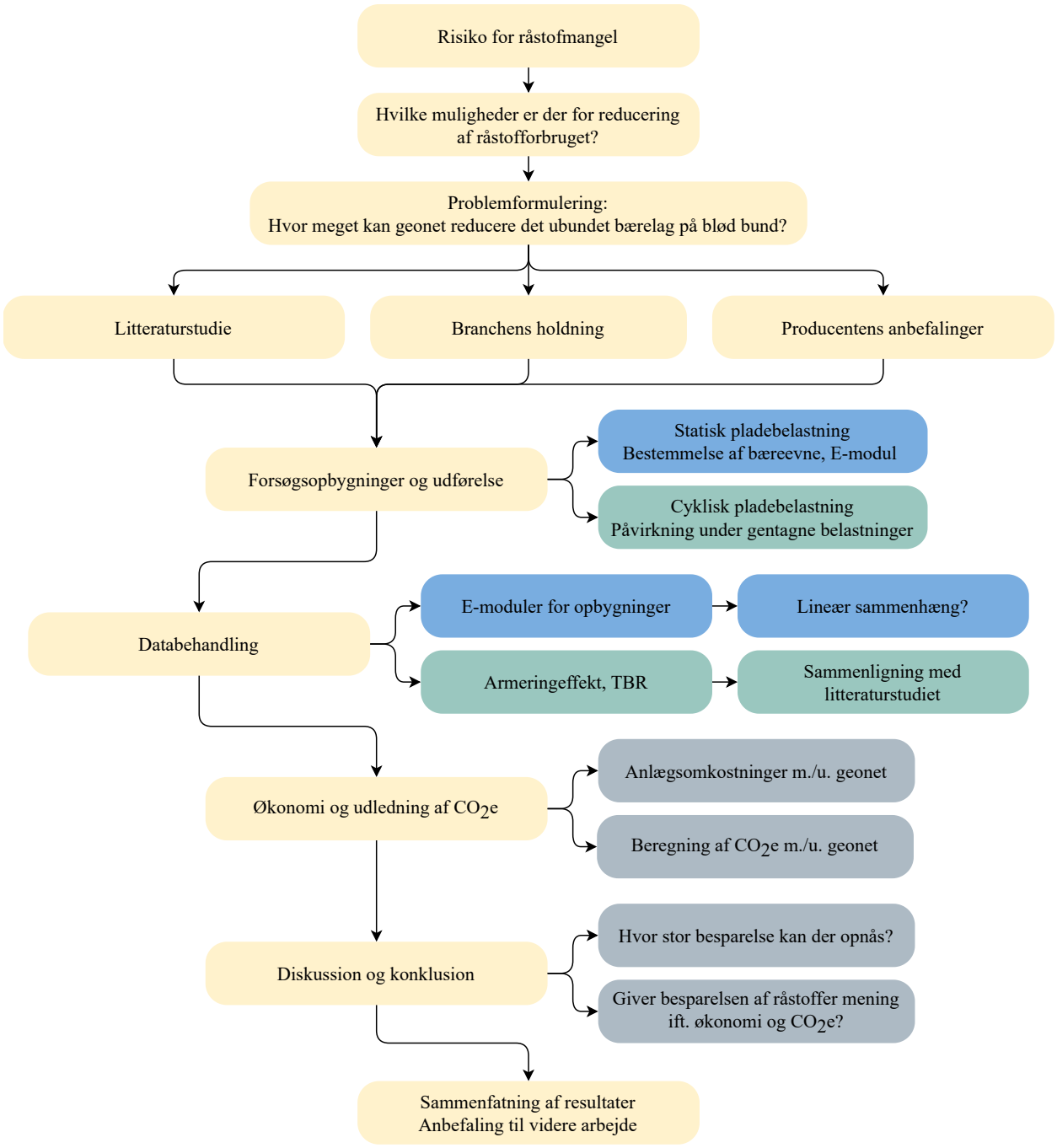
Specialet afgrænser sig til at undersøge effekten af to udvalgte geonet beregnet til trafikklasse T5, i det ubundne bærelag, stabilt grus. Derudover afgrænses der til, at effekten undersøges på to forskellige simuleret underbunde af ekspanderet polystyren, hvor der anvendes den størst mulige styrkeforskel inden for denne produktkateri, som har været muligt at fremskaffe til projektet. Det antages derfor, at ekspanderet polystyren vil agere sammenligneligt med en virkelig blød bund af eksempelvis silt eller ler. Opbygningerne med geonet vil blive sammenlignet med kontrolforsøg og denne sammenligning danner basis for styrkeforøgelsen ved implementering af geonet. Dette speciale antager, at styrkeforøgelsen i opbygningerne med geonet kan opnås ved at reducere det ubundne bærelag og opnå samme E-modul som i en opbygning uden geonet. Alternativt vil være at anvende styrkeforøgelsen til en forbedret levetid. Opbygningerne testes i et indendørs testsetup, hvor der vil blive udført statisk og cyklisk pladebelastning. Dette er gjort for at sikre ens forudsætninger for forsøgene.

Afgrænsningen betyder, at der ikke kan konkluderes på andre underbunde end de undersøgte. Ydermere vil det kun være muligt at beskrive effekten af geonet indlagt i det ubundne bærelag stabilt grus. Der afgrænses fra at kontrollere vandindholdet og den dertilhørende styrkeforøgelse/forringelse af stabilt gruset samt den eventuelle konsekvens af, at det ikke har været vibreret ved optimalt vandindhold. Stabilt gruset har været tildækket med plastik, når det har været muligt for at begrænse udtørring. Forsøgene er blevet udført over en periode på to måneder. Grundet en kort testperiode vil der som udgangspunkt kun udføres et forsøg med statisk pladebelastining og to forsøg med cyklisk pladebelastning på hver forsøgsopbygning.

Specialet afgrænser sig til at belyse økonomi og CO_2e i produkt- og anlægsfasen, hvorfor det ikke belyses, hvilke omkostninger der vil være ved vedligeholdelse, efter endt levetid og ved eventuel genanvendelse. CO_2e beregningen er der afgrænset fra vejopbygningen øvrige lag, hvorfor der kun er medtaget geonet og stabilt grus.

2 Metode

I det følgende beskrives de anvendte metoder. Afsnittet vil præsentere dataindsamlings- og den anvendte analysemetode. Tilmed præsenteres fremgangsmåden for litteratursøgning, herunder hvordan søgeresultater er sorteret til eller fra. Et procesdiagram for specialets fremgangsmåde er vist på figur 2.1.



Figur 2.1: Procesdiagram for specialets fremgangsmåde.

2.1 Interview med Vejdirektoratet

Interviewformen i dette speciale har taget udgangspunkt i et semistruktureret interview, som beskrevet af Brinkmann og Tanggaard (2020). Et semistruktureret interview indebærer bl.a. udformning af en interviewguide forud for mødet, hvor der forberedes målrettede spørgsmål. Til mødet skal interviewholderen holde interviewet til emnet, men den semistruktureret interviewform giver også mulighed for at stille supplerende spørgsmål, hvor der er plads til at gå i andre retninger. Nogle af fordelene og ulemperne ved interviewformen er listet i tabel 2.1

Tabel 2.1: Fordele og ulemper ved den semistruktureret interviewform, hvilket er beskrevet af (Brinkmann og Tanggaard, 2020).

Fordele	Ulemper
Flere nuancer i interviewpersonernes svar	Risiko for respodenter overses
Mindre struktur, som tillader at spørge uden for det planlagte emne og give bredere svar	Kan fremstå som et hektisk forløb, hvis samtalen ikke rettes ind
Interviewpersonernes svar er dybdegående	Interviewformen kræver forberedelse
Giver mulighed for informationsudveksling fra både respondent og interviewer	Begrænset teoretisk og praktisk erfaring fra intervieweren, hvilken kan give risiko for udforudsete eller uhensigtsmæssige emner

Interview er udført med Finn Thøgersen og René Hvidbak Sørensen fra Vejdirektoratet. Interviewet er udført over Microsoft Teams.

Fremgangsmåden til at udføre interviewet er følgende:

- Forberedte spørgsmål
- Under interview er der stillet målrettede og uddybende spørgsmål
- Mødet er blevet transkripteret og optaget
- Efterfølgende er transkriptionen blevet behandlet og relevant indhold inddraget i specialet.

Inden interviewet blev følgende spørgsmål forberedt:

- Præsentation af jer selv
- Hvad er Vejdirektoratets holdning til geonet i belægningsopbygninger?
- Hvornår anvender Vejdirektoratet geonet i vejopbygninger?
- Hvilken styrke og svaghed ser de ved anvendelse af geonet i vejopbygninger?
- Hvilket projekter har Vejdirektoratet anvendt geonet?
- Hvornår anvendes geonet, hvad er årsagen, når geonet ikke anvendes?
- Hvad er årsagen til der ikke er skrevet en Vejregel eller anbefaling til anvendelse af geonet i de ubundne bærelag på blød bund?
- Hvordan ser I muligheden for, at geonet kan reducere materialer i belægningsopbygninger?

2.2 Samtale Byggros

Der er udført en samtale over en mailkorspondance med den administerende direktør i Byggros Anders Kjeld. Han er stillet en række spørgsmål, som branchen oplever er en udfordring ved etablering af geonet. Spørgsmålene fremgår nedenfor:

- Vejdirektoratet oplever geonet, som en udfordring, når der skal udføres en reparation eller ledningsejer skal i vejkassen. Hvordan anbefaler I sådan en procedure ske i foregå?

- Er det under overvejelse, at jeres geonet kan fremstilles af genbrugsplast? Har I udført nogen beregninger på at besparelse af materiale godt kan betale sig miljømæssig med geonet?

2.3 Spørgsmål til relevante aktører

For at afdække nuværende pris og forhold for vejens ubundne bærelag er der fremsendt mail med spørgsmål om stabilt grus II. Følgende spørgsmål er stillet til forhandlere: Vrå Mørtelværk og Nymølle Stenindustrier A/S, jordentrepreør: Arkil, samt transportfirmaer DSV Transport og SCT Transport. Der har været små justeringer efter, hvilken part der er blevet adspurgt.

1. Hvordan leverer I normalt stabilt grus til store anlægsprojekter, og hvor langt transporterer I det gennemsnitligt?
2. Hvor mange tons stabilt grus kan I levere pr. lastbil/sættevogn?
3. Hvad er prisen for materialer og levering pr. tons, når I skal levere stabilt grus II, hvis vi i en tænkt beregning skal bruge ca. 40.000 tons stabilt grus og antager en transportafstand på 40 km?
4. Har I mulighed for at fremsende vibrations- og sigteanalyse af jeres stabilt grus II?
5. Har I mulighed for at fremsende produktspecifik miljøvaredekleration, EPD på jeres stabilt grus II?

2.4 Litteratursøgning

Litteraturstudiet indsamler allerede beskrevet viden indenfor området. Det har til formål at afdække eksisterende litteratur på området, omkring brug af geonet af polypropylen indlagt i eller under det ubundne bærelag i vejopbygningen, både nationalt og internationalt. Der vil derfor blive udformet søgeord på både dansk og engelsk.

Der er søgt efter international litteratur i videnskabelige databaser, som indeholder forskningsbaseret litteratur. Ydermere er der søgt på Aalborg Universitetsbibliotek (Primo) og Google Scholar for at finde supplerende litteratur.

De anvendte videnskabelige databaser udgør:

- Engeneering Village - Elsevier
- ScienceDirect - Elsevier
- TRID - Transportation Research Information Documentation
- Web of Science - Clarivate

Den nationale litteratur er fundet i relevante artikelarkiver med udgangspunkt i veje- og trafiktekniske.

De relevante nationale artikelarkiver udgør:

- Trafikdages artikelarkiv
- Trafik og Vejes artikelarkiv
- Vejdirektoratets udgivelser

Til søgeprocessen er der formuleret forskellige søgeord. Søgeordene kan være omkranset af anførselstegn "...", hvilket henstiller til, at søgeordene skal være anført i denne specifikke rækkefølge. Herudover kan det være nødvendigt at afslutte søgeordene med trunkering ...*, så databasen søger efter ordet med flere forskellige endelser. Dette er eksempelvis anvendt for "poly*", som dækker over flere forskellige typer af plastik. For at skabe en søgestreng er der anvendt boolske

operatorer, herunder AND, OR eller NOT. Ved enkelte databaser er det nødvendigt at supplere søgestrengen med paranteser (...), så databasen eksempelvis prioriterer OR før AND. De endeligt anvendte søgeord er vist i tabel 2.2.

Tabel 2.2: Brugte søgeord på dansk og engelsk. Der er hovedsageligt søgt med de primære søgeord, hvorefter der er blevet suppleret med et eller flere sekundære søgeord, hvis det har været nødvendigt.

		Dansk	**Engelsk**
Primære søgeord	(1)	Geonet	Geogrid*
	(2)	Plastik	Geosyntetic*
	(3)	Forstærkning OR Stabilisering	Reinforce* OR Stabiliz*
	(4)	Planum OR Stabilt grus	Subgrade OR Subbase
	(5)	Belægning*	Pavement*
Sekundære søgeord	[1]	Biaksial* OR Triaksial*	Biaxial OR Triaxial
	[2]	Grus	Gravel OR Aggregate*
	[3]	Bæreevne	Carrying capacity OR Bearing capacity
	[4]	E-modul OR Elasticitetsmodul	Young's modulus

Litteratur er blevet søgt og i første omgang udvalgt på baggrund af titel og abstract. Litteraturen er fundet i hele verden, bl.a. er der fundet relevante studier i USA og Kina. Der er søgt videnskabelige artikler på engelsk, men suppleret med nationale artikler på dansk og der er søgt i vejledninger om vejopbygning, udover i Danmark, i Norge, Sverige og USA. De fleste relevante videnskabelige artikler er skrevet inden for de seneste 15-20 år, hvor der har været en udvikling indenfor typer og brugen af stive geonet af plastik i vejopbygningen. Resultaterne er angivet i den faktisk søgte rækkefølge, ligesom dubletterne. Efter søgeprocessen er litteraturen blevet gennemgået, noget fravalg og noget endeligt brugt i rapporten. Processen er sammenfattet i tabel 2.3. Nogle af søgeresultaterne har været utilgængelige, hvis de eksempelvis ikke har været tilgængelige online, eller hvis der ikke har været tilladt adgang igennem universitetsbiblioteket.

Tabel 2.3: Søgeresultater i både danske og engelske databaser og hvornår i processen litteraturen eventuelt er taget ud. Fravalgt dækker over litteratur der er blevet taget ud efter gennemlæsning. Søgeordende er adskilt med AND.

Sprog	Database	Søgeord	Resultat	Dublet	Utilgængelig	Synes relevant	Fravalgt	Endeligt brugt
Dansk	Trafikdage	(1)	0	0	0	0	0	0
	Trafik & Veje	(1)	2	1	1	1	0	1
	Vejdirektoratet	(1)	4	0	2	2	1	1
	Google Scholar	(1)	17700					
		(1)(4)	98	0	2	3	2	0
	Aalborg Projektbibliotek	(1)	10	0	0	5	3	2
Engelsk	Engeneering Village	(1)(2)(3)(4)(5)	79	0	10	25	22	3
	ScienceDirect	(1)(2)(3)(4)(5)	240					
		AND [1]	85	0	0	13	1	2
	TRID	(1)(2)(3)(4)(5)	110	23	51	6	4	2
	Web of Science	(1)(2)(3)(4)(5)	83	51	6	9	8	1
	AUB	(1)(2)(3)(4)(5)	238					
		AND [1]	103	14	0	1	1	0
	Google Scholar	(1)(2)(3)(4)(5)	5180					
		AND [1]	2630					
		AND [1][2]	2180					
		AND [1][2][3]	1510					
		AND [1][2][3][4]	92	13	23	1	1	0
	U.S. Department of Transportation	(1)	22	0	1	5	2	3
Norsk	Statens Vegvesen	(1)	5	0	0	5	1	4
Svensk	Trafikverket	(1)	1	0	0	0	0	0

Der er i søgeprocessen suppleret med et eller flere sekundære søgeord, hvilket har været nødvendigt for at afgrænse og specificere søgningen yderligere af hensyn til at nedbringe antallet af resultater og/eller hvis store dele af søgeresultaterne synes irrelevant. De sekundære søgeord er valgt ud fra en itterativ process om at reducere søgeresultaterne uden at frasortere allerede fundet relevant litteratur i databasen. Særligt i databasen Google Scholar har det været nødvendigt at afgrænse søgningen med supplerende ord, fordi det de primære søgeord alene frembragte mange resultater herunder meget irrelevant litteratur.

I de videnskabelige databaser har der som udgangspunkt kun været søgt efter videnskabelige artikler på engelsk, som har været tilgængelige online. Antallet af søgeord blev afgrænset i Science Direct, hvor der højest kunne anvendes otte boolske operatorer. Nogle af de emner, som indledningsvist bestemte, om de videnskabelige artikler blev fundet relevant eller irrelevant er opskrevet i tabel 2.4.

Tabel 2.4: Udslagsgivende relevante og irrelevante emner i den indledende gennemgang af videnskabelig artikler.

Relevante emner	Irrelevante emner
Geonet indlagt mod planum	Geonet indlagt i asfalten
Fokus på forsøg i de ubundne lag	Fokus på forsøg i de bundne lag
Belægninger under veje	Belægning under jernbaner eller konstruktioner
Fuldskalaforsøg	Forsøg i mindre skala
Studie omhandlende forsøg	Numerisk studie
Studie om materialebesparelse	Studie om drænevne
Geonet i plastik med stive knudepunkter	Geonet i andre materialer eller stivheder
Studie med fokus på at forstærke jordlaget	Studie med fokus på at adskille de enkelte lag i vejopbygningen
Geonet som forstærkelse af jordlag	Geoceller som forstærkelse af jordlag
Søgeresultater på samme sprog som søgeordende	Søgeresultater på andre sprog end søgeresultaterne
Geonet til forlængelse af vejens levetid	Geonet til beskyttelse af nedgravede rør
Test af deformationer ved pladebelastning direkte på ubunden opbygning	Test for deformationer ved sporkøring på vejopbygning med asfalt

I forbindelse med den efterfølgende gennemlæsning af litteratur, som synes relevant, er der anvendt kædesøgning og citationssøgning, hvor der har været mulighed for at supplere med andet relevant litteratur, som endnu blev fundet i processen med litteratursøgning. Den endeligt brugte litteratur til specialet er sammenfattet i kapitel 3.

2.5 Forsøgsudførelse

Der vil i dette afsnit blive præsenteret, hvilke forsøgsmetoder der er anvendt til dataindsamling.

2.5.1 Sigteanalyse

Sigteanalyse udføres for at bestemme om et materiale overholder de grænseparametre som er givet for et materiale. Hvorfor der udføres sigteanalyse, for at bestemme kornstørrelserne, standardafvigelsen og en kornkurve for materialet. Parametrene, bruges til at klassificere kornmaterialets egenskaber, som permeablilitet, stabilitet og densitet af fyldmaterialet.

I dette speciale er der fra leverandøren udført sigteanalyse for det anvendte stabilt grus. Resultatet fra prøverne fremgår af appendiks A Hvorfor det ikke har været nødvendigt at supplere med en sigteanalyse lavet på Aalborg Universitet.

2.5.2 Pladebelastning

Pladebelastning udføres normaltvis med udgangspunkt i et 10-tons akseltryk og dimensionsgivende last (Bolet og Busch, 2016). Den dimensionsgivende last beregnes med en stødtillæg på 20% og fordeles på hvert hjul, så lasten kommer til at være:

$$\mathrm{P} \sim \frac{1}{2} \cdot 120\% \cdot 100\mathrm{kN} = 60\mathrm{kN}$$

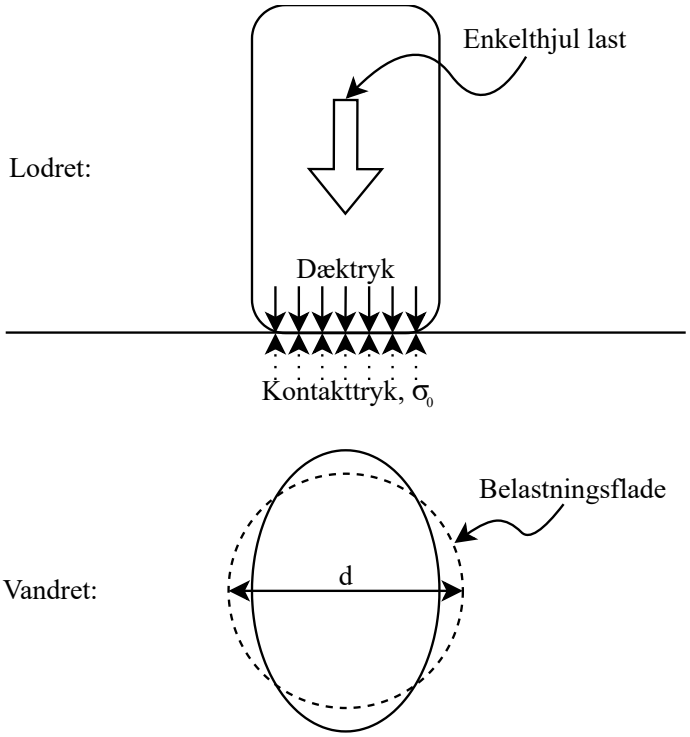
Ifølge Bolet og Busch (2016) er kontakttrykket σ_0 defineret til:

$$\sigma_0 = 0{,}7\text{MPa}(\frac{\text{N}}{\text{mm}^2})$$

Hvilket fører til følgende kontaktareal:

$$\text{a} = \sqrt{\frac{\text{P}}{\sigma_0 \cdot \pi}} = 165\text{mm}$$

Dette er den belastningsflade, som svarer til en cirkulær belastningsflade $\text{d} = 330\text{mm}$. Sammenlignet med et dæk kan kontakttrykket tilnærmelsesvist regnes ensartet fordelt over belastningsfladen, hvilket giver arealet som illustreret på figur 2.2.



Figur 2.2: Principskitse for et enkelthjul med belastningsfladen.

Statisk pladebelastning

Statisk pladebelastningsforsøg er et forsøg, som kan anvendes til at bestemme bæreevnen af en vejopbygning. Resultaterne kan anvendes til optimering af vejens bæreevne og levetid. Eksempelvis til besparelses af materialer.

Statisk pladebelastningsforsøg er en metode, som anvendes til at bestemme jords bæreevne og dens deformationsegenskaber. Forsøget indebærer, en stålplade som sættes i kontakt med en opbygning. Her påføres gradvist en stigende belastning på pladen fra en hydraulisk aktuator, indtil pladen opnår en bestemt deformation eller belastning. (Ovesen et al., 2017)

Under forsøget måles deformationen af pladen og det resulterende jordtryk, som der skabes med en hydrauliske aktuator. Det indsamlet data kan anvendes til at bestemme jordens

styrkeegenskaber og evnen til at modstå belastning. Forsøget kan give information om vejopbygningens deformationsegenskaber. (Ovesen et al., 2017)

Der er under det statiske pladebelastningsforsøg brugt en hydraulisk aktuator og en cirkulærplade med en diameter på 335 mm, hvormed pladens diameter er 5 mm større end det kontaktareal, som en vejkasse normalt dimensioneres efter. Forsøget er programmeret til en en maksimal deformation op til 100 mm, hvorfor belastningen er variabel indtil de 100 mm opnås. (Dansk Geoteknisk Forenings Feltkomité, 2005)

Statisk pladebelastning anvendes i dette speciale til at bestemme materialets E-modul. Et E-modul er størrelsen af et materiales stivhed, som normalt er angives i MPa. Det er defineret ved forholdet mellem spændingen, som er kraft pr. areal enhed, og tøjningen, som er deformationen pr. lagtykkelse af opbygningen. Følgende udtryk er anvendt til bestemmelse af E-modulet, hvor hældningen definerer E-modulets størrelse. (Ovesen et al., 2017)

$$\mathrm{E} = \frac{\sigma}{\epsilon} \rightarrow \sigma = \frac{\mathrm{F}}{\mathrm{A}} \rightarrow \epsilon = \frac{\Delta \mathrm{l}}{\mathrm{l}_0}$$

hvor

E	E-modul [MPa]
σ	Spænding [MPa]
ϵ	Tøjning [-]
F	Kraft [kN]
A	Areal af belastningsplade [mm^2]
Δ l	Deformation [mm]
l_0	Lagtykkelse [mm]

Cyklisk pladebelastning

Cyklisk pladebelastning er en jordbundsundersøgelse, der involverer gentagen belastningscyklus, som normalvis udføres med en cirkulær stålplade. Forsøget udføres med en hydraulisk aktuator, som påfører gentagende belastninger med pladen på en testopbygning. Pladen kan indstilles med forskellige belastningshastigheder og amplitude. Under forsøget måles deformationen af belastningspladen og det resulterende jordtryk, som skabes grundet belastning.

Test med cyklisk pladebelastning udføres blandt andet til at bestemme en jords dynamiske egenskaber og påvirkning under gentagen belastningscyklus. Dette kan blandt andet være i forbindelse med trafikbelastning på en vej. Yderligere kan forsøgsresultaterne give information om jordens styrke og deformationsegenskaber under gentagen belastning. Dette kan, ligesom forsøg med statisk pladebelastning, være vigtig for design af vejopbygning, som kan resultere i en materialebesparelse eller forøget levetid.

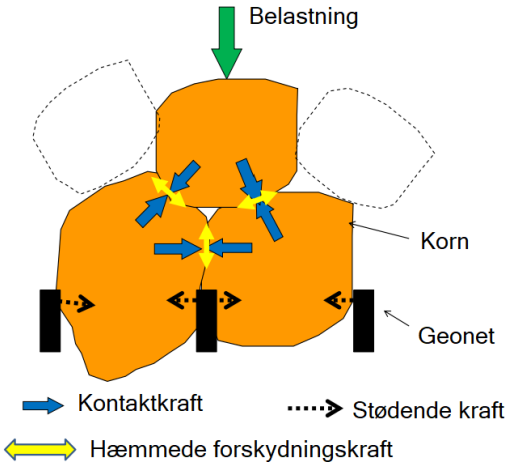
Der er i dette speciale anvendt cyklisk pladebelastning med en hydraulisk aktuator, som har udført gentagende belastninger med en cirkulær plade med en diameter på 335 mm. Der er valgt en frekvens for hver cyklus på 10 s, hvilket giver en frekvens på 0,1 Hz.

3 Litteraturstudie

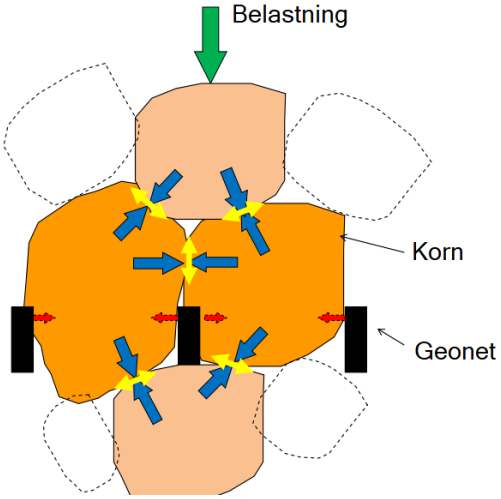
I dette kapitel fremgår udenlandske erfaringer og studier, som er præsenteret i litteraturstudiet. Metoden og fremgangsmåden fremgår i afsnit 2.4.

3.1 Ph.d. - forudsætninger for anvendelse af geonet

I en artikel fra Rusland udgivet af Zikmund Rakowski (2017) tager udgangspunkt i et ph.d. projekt, som beskriver opfattelsen af geonet i opbygninger. Ifølge artiklen er opfattes geonettet, som et mekanisk lag og ved dimensionering af opbygninger med geonet, skal det betragtes som lag og ikke en sammenhængende opbygning. Geonet opnår en mekanisk effekt ved grusfraktioner, som låses i maskestrukturen. Denne låsning er vist på figur 3.1 og 3.2. (Zikmund Rakowski, 2017)



Figur 3.1: Grusfraktioner fastlåses til maskerne på geonettet. Hvordan kræfterne optages af geonettet fremgår af figuren (Zikmund Rakowski, 2017).



Figur 3.2: Grusfraktioner fastlåses til maskerne både på over- og undersiden af geonettet (Zikmund Rakowski, 2017).

Figurerne viser hvordan grusfraktionerne låses i geonettet. Jf. figur 3.1 er stenene korrekt låst i maskerne, eftersom stenene låses ved en lodret belastning, kræfterne optages imellem grusfraktionerne.(Zikmund Rakowski, 2017) På figur 3.2 er forskydningsstyrken mellem kornene næsten 0, da maskerne er låst både foroven og forneden. Herved dannes en lille form for klippe, som, gør, at stene ikke på samme måde presses væk fra hinanden. Systemet her er stivere end på figur 3.1, da der dannes en ekstra stærk struktur, fordi geonettet aktiveres både fra oven og fra neden. De vigtigste parametre ved anvendelse af geonettet er ifølge studiet:

- Kornstørrelse og maskestørrelse passer sammen
- Geonettets ribbeform og stivhed

Stivheden af geonet har betydning for styrkeforøgelsen. Feltobservationer viser, at grusmaterialet er korrekt indbygget ved at tippe materialet ned over geonettet, da de største grusfraktioner placere sig ved geonettet, grundet tyngdekraften. Den maksimale kornstørrelse konkluderes derfor til at have en betydning for låsningseffekten. Det anbefales ud fra dette studie, at 1,4 x maskestørrelsen bør være størrelsen på de største grusfraktioner. På den måde opnås den stærkeste låsning og

dermed den største styrkeforøgelse. Ifølge studiet, virker biaksial geonet kun diagonalt og triaksial virker tredimensionelt, hvorfor biaksial geonet har den svageste låsningen af grusfraktionerne og dermed dårligste fordeling af kræfterne. (Zikmund Rakowski, 2017)

Ifølge studiet er det ikke styrken af geonettet, der er den største faktor for effektiviteten af det mekaniske lag. Låsning sker ved passende grusfraktioner til maskerne geonettet. Bæreevnen øges yderligere ved at tilføje stabilt grus på begge sider af geonettet, eftersom forskydningskrafterne reduceres betragteligt ved grusfraktioner under geonettet. (Zikmund Rakowski, 2017)

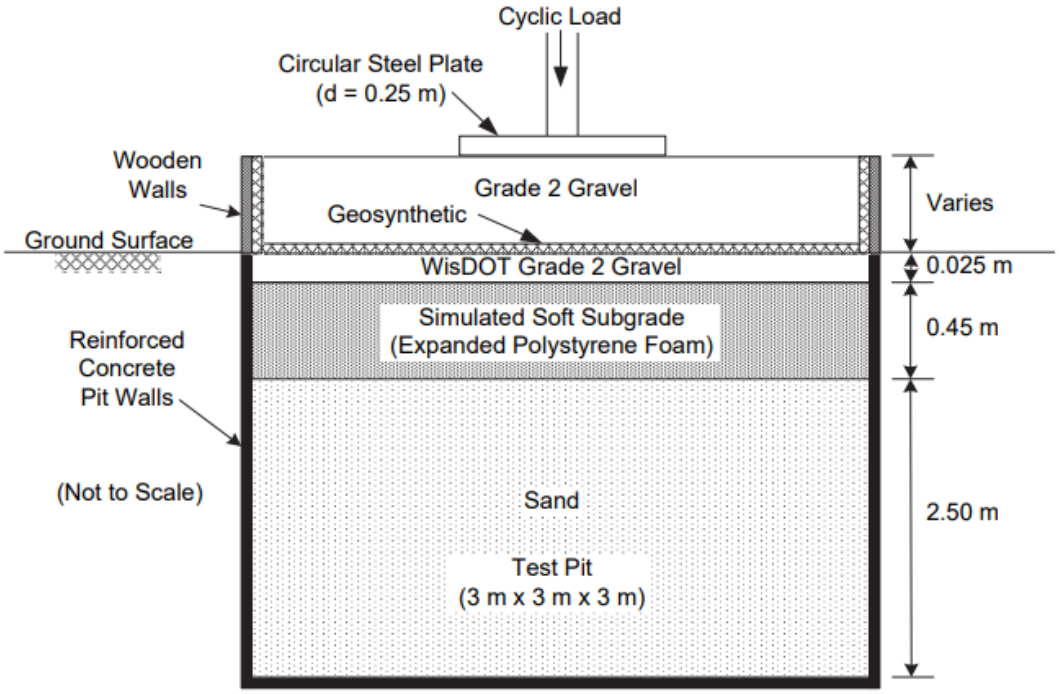
3.2 Fuldskalaforsøg på blød bund

En videnskabelig artikel fra Syd Korea udarbejdet af Woon-Hyung et al. (2006) beskriver et forsøg med geonettes indvirkning på stabilt grus oven på en blød bund. Blød bunden er simuleret med ekspanderet polystyren, EPS. Der er i forsøgsopbygningen indlagt et biaksial geonet, som er fremstillet af polypropylen. Dimensionerne på geonet og grusbærlag fremgår af tabel 3.1.

Tabel 3.1: Dimensioner på biaksial geonet og stabilt grus (Woon-Hyung et al., 2006).

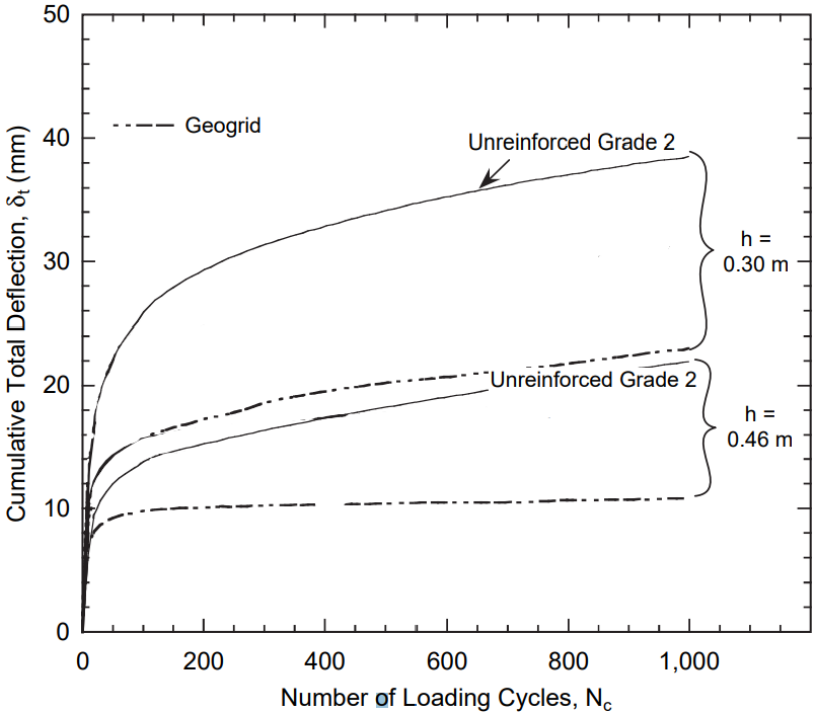
Planum	
Styrke	7 MPa
Grusmateriale	
Grusfraktioner	45 %
Sandfraktioner	47 %
Finstof	8 %
Tørdensitet, $\rho_{d,max}$	2,30 $\mathrm{t/m^3}$
Biaksial geonet	
Masse pr. arealenhed	253 $\mathrm{g/m^2}$
Maskestørrelse	32 x 45 mm
Maksimal trækstyrke	17 $\mathrm{kN/m}$
Flydegrænse forlængelse	253 $\mathrm{g/m^2}$
E-modul	88 kN/m

Forsøget er udført i fuldskala i laboratoriet, forsøgsopstillingen fremgår af figur 3.3.



Figur 3.3: Forsøgsopstilling til test af geonet på blødbund (Woon-Hyung et al., 2006).

Opstillingen er testet med cyklisk pladebelastning, pladen har en diameter på 0,25 m og en tykkelse på 25 mm. Hvilket svarer til et belastningsareal på 0,05 m^2 svarende til et dæktryk på 0,7 MPa. Der er udført op til 1.000 cyklus med belastning på 0,1 sekund og en pause mellem hver belastning på 0,9 sekund. Resultaterne fra de cykliske belastninger fremgår af figur 3.4.



Figur 3.4: Afbildning af deformation afhængig af antal cykliske belastninger. Der fremgår to forskellige lagtykkelser af stabilt grus, 0,30 m og 0,46 m (Woon-Hyung et al., 2006).

Det fremgår af figur 3.4, at den armerede opbygning opnår en betydelig mindre deformationen end den uarmret. Hvorfor geonettet har forøget stivheden af opbygningen. Den største forskel i deformationen er ved en lagtykkelse på 0,30 m oven på geonet. Her reduceres deformationen ved nr. 1.000 cyklus fra 38 til 22 mm. Ved en lagtykkelse på 0,46 m, reduceres deformationen ved nr. 1.000 cyklus fra 20 til 10 mm. Hvorfor det eftervises, at geonet har en forbedring af stivheden, og dermed mulighed for reducering af bærelaget.

Studiet antager lineær interpolation mellem lagtykkelsen af stabilt grus og deformationen efter 1.000 cyklus. Herudfra er der bestemt en nødvendige lagtykkelse for at opnå deformationer på henholdsvis 12, 25 og 38 mm efter belastning af nr. 1.000 cyklus. Resultaterne fremgår af tabel 3.2.

Tabel 3.2: Bestemt lagtykkelser af stabilt grus for at opnå en deformation på henholdsvis 12, 25 og 38 mm efter nr. 1.000 cyklus (Woon-Hyung et al., 2006).

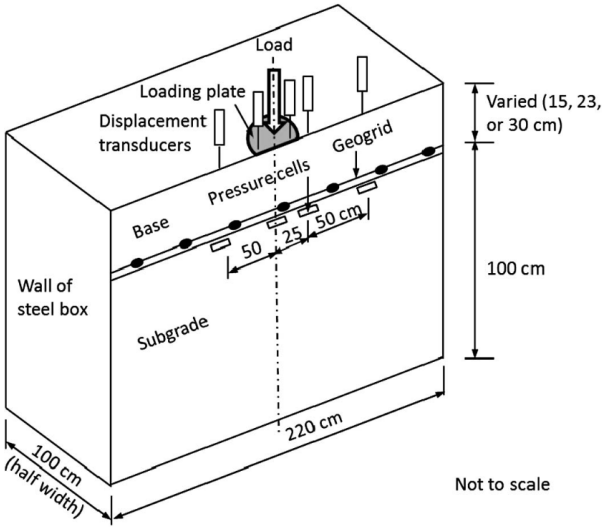
Lagtykkelse ud fra bestemt deformation			
Deformation	δ = 12 mm	δ = 25 mm	δ = 38 mm
Grus [m]	0.69	0.41	0.31
Med geonet [m]	0.42	0.28	0.22
Forskel [m]	0,27	0,13	0,09

Studiet anvender en grustype kvalitet II, som har lidt finere grusfraktioner end en traditionel stabilt grus II. Resultaterne viser, at der ved en tilladelig deformation på 12 mm, svarer styrkeforøgelsen til en reduktion i lagtykkelsen på 27 cm. Forsøget efterviser, at der ved indlæggelse af geonet kan spares stabilt grus og deformationen kan mindskes grundet geonettets evne til at styrke grusbærelagets E-modul.

3.3 Tre triaksiale geonet på blød bund

En videnskablig artikel udgivet af Qian et al. (2013) i USA, beskriver og præsenterer et fuldskalaforsøg med triaksiale geonettes indvirkning på blød bund. Testboksen til forsøget af fremgår 3.5 og forsøgsoptillingen fremgår af figur 3.6.

Figur 3.5: Geoteknisk testboks til udførsel af fuldskalaforsøg med geonet (Qian et al., 2013).



Figur 3.6: Forsøgsopstilling med pladebelastningsforsøg (Qian et al., 2013).

Forsøget er opbygget nedefra med følgende opbygning:

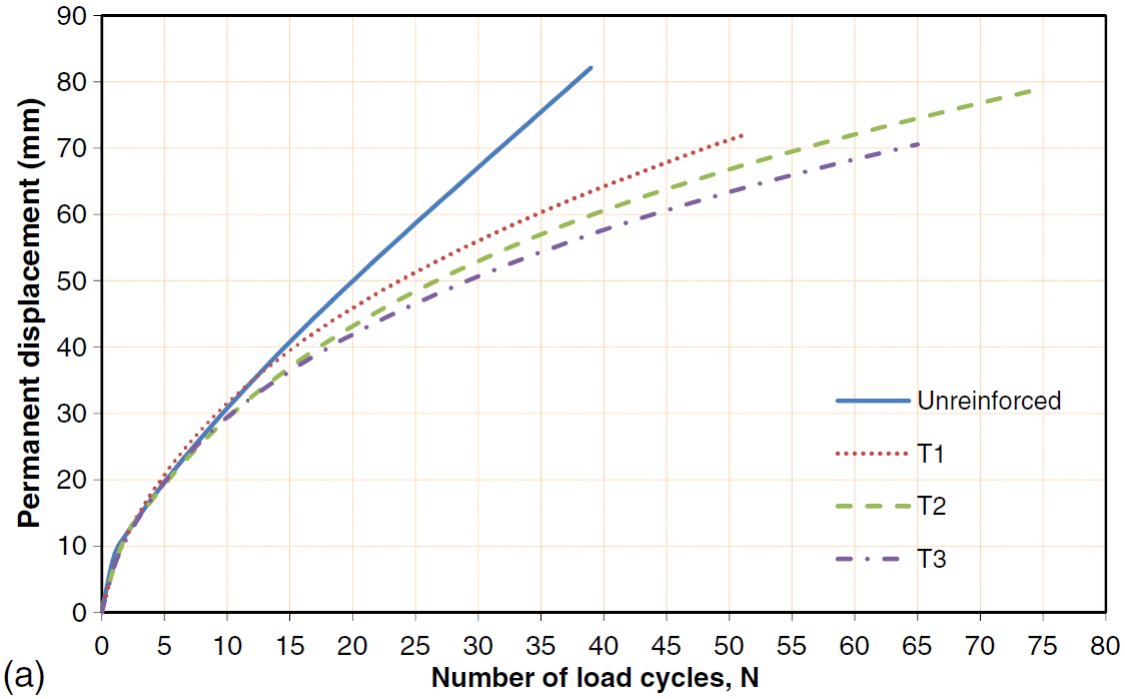
1. Underbund med en styrke på 16-20 MPa
2. Geonet - tre forskellige triaksiale geonet
3. Stabilt grus med et E-modul på 200 MPa, med lagtykkelse på 15, 23 og 30 cm.
4. Pladebelastning med en plade på 0,3 m i diameter med spidsbelastning op til 40 kN.

Der er valgt i forsøget, at udføre belastninger med 40 kN svarende til et kontakttryk på 0,55 MPa. De anvendte triaksiale geonet og deres styrkeparametre er vist i tabel 3.3.

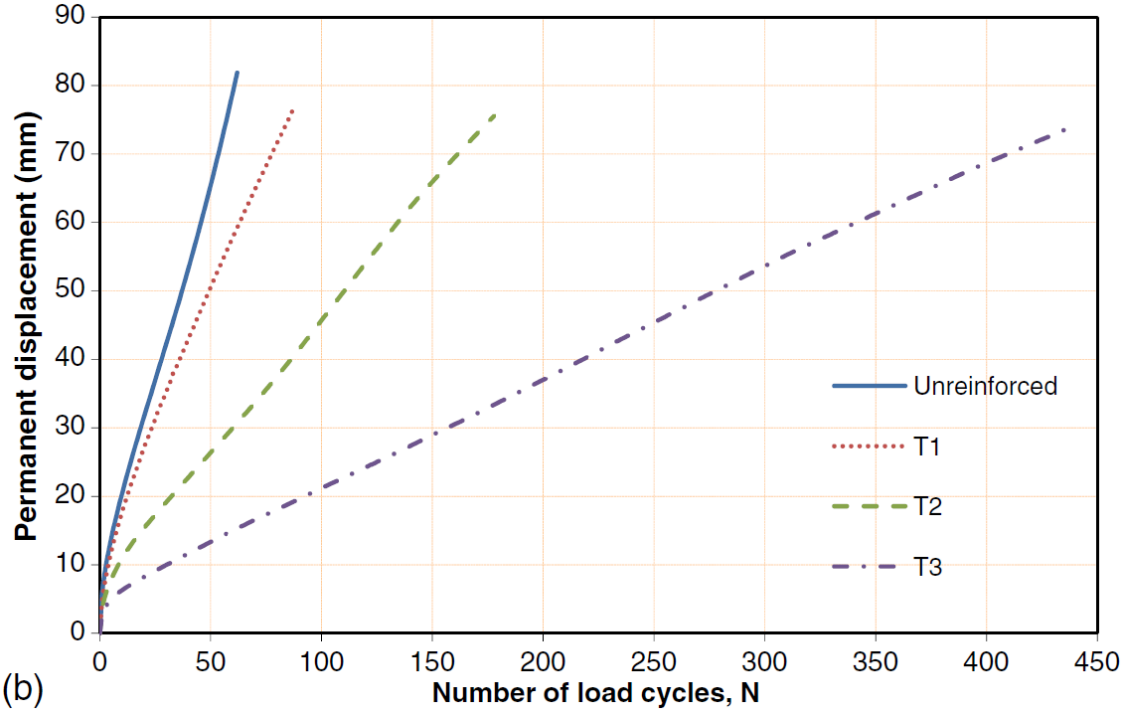
Tabel 3.3: Parameter for anvendte triaksiale geonet (Qian et al., 2013).

Parameter	**T1**	**T2**	**T3**
Maskestablitet kg-cm/ grader 5.0 kg-cm	3.0	3.6	5.6
Radial stivhed (ved 0,5% stræk) [kN/m]	225	300	365

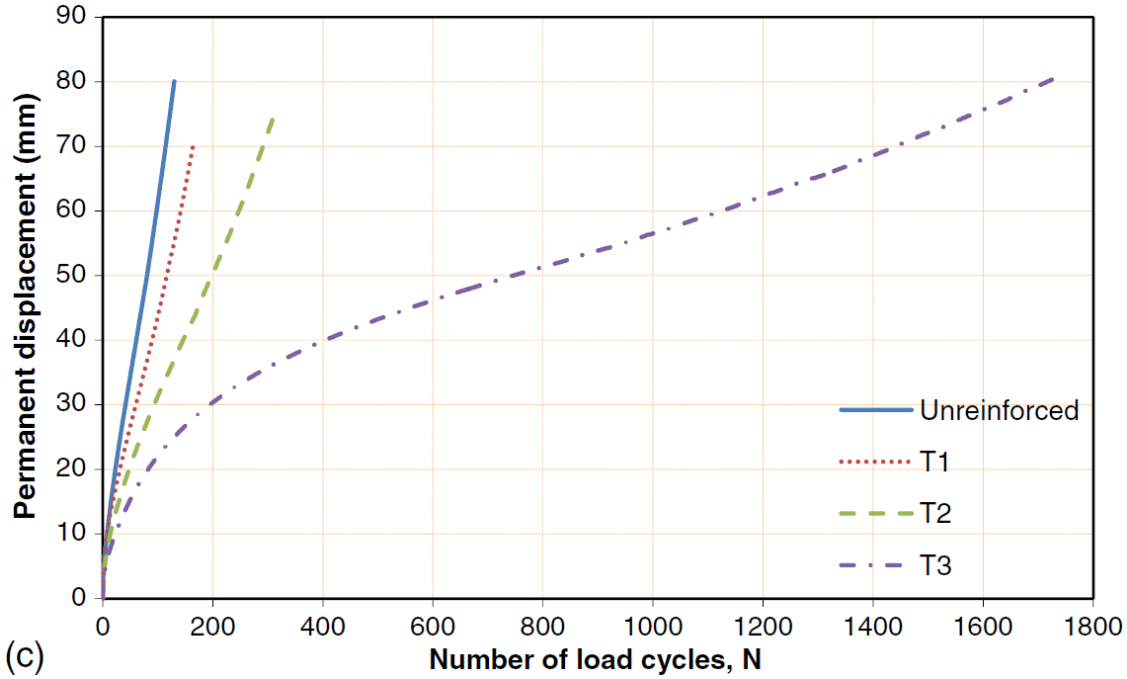
Resultaterne for cyklisk pladebelastningsforsøg for henholdsvis en lagtykkelse på 15, 23 og 30 cm fremgår af figur 3.7, 3.8 og 3.9.



Figur 3.7: Cyklisk pladebelastnings forsøgsresultater med deformation i forhold til antal cyklus, udført med 15 cm stabilt grus oven på geonet (Qian et al., 2013).



Figur 3.8: Cyklisk pladebelastnings forsøgsresultater med deformation i forhold til antal cyklus, udført med 23 cm stabilt grus oven på geonet (Qian et al., 2013).



Figur 3.9: Cyklisk pladebelastnings forsøgsresultater med deformation i forhold til antal cyklus, udført med 30 cm stabilt grus oven på geonet (Qian et al., 2013).

På graferne observeres det, at antallet af cyklus der skal til før der opnås en deformation på 75 mm stiger jo større lagtykkelsen er, hvilket hænger sammen med, at stivheden i bærelaget øges i takt med den øgede lagtykkelse.

Resultaterne viser yderligere, at geonet har en indvirkning på stivheden, forskellen på den armerede og uarmerede opbygning relativ stor, ligeledes er forskellen på geonettes stivhed også en betydning for den opnået deformation. Ved lav belastning og lagtykkelse på 15 cm, er det svært at se en forskel mellem geonettene. Hvorimod hvis lagtykkelsen øges og antallet af cyklus øges, er der en forskel i deformation på 75 mm. Resultaterne fra graferne er listet i tabel 3.4, hvor forholdet mellem de armerede test og den uarmerede test er defineret ved, armeringseffekt: TBR $= \frac{N_{armeret}}{N_{uarmeret}}$.

TBR-værdierne fremgår af tabel 3.4. Forsøget er stoppet, hvis der er opnået en deformation på omkring 75 mm.

Tabel 3.4: Forholdet mellem den armerede og uarmerede test (Qian et al., 2013).

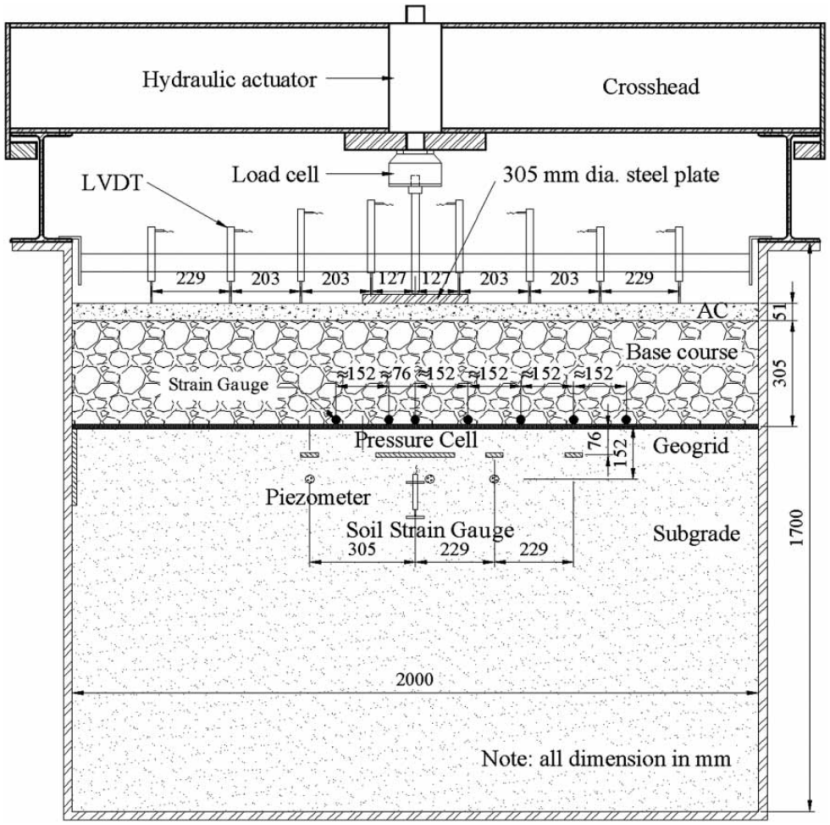
Stabilt grus [cm]	**Deformation** [mm]	**T1** Geonet	**T2** Geonet	**T3** Geonet
15	25	1	1	1
	50	1,1	1,3	1,4
	75	1,6	1,9	2,3
	Gennemsnit	1,2	1,4	1,6
23	25	1,7	3,4	8,9
	50	1,6	2,9	7,3
	75	1,7	3,1	7,7
	Gennemsnit	1,7	3,1	8,0
30	25	1,4	2,2	4,1
	50	1,4	2,5	9,2
	75	1,5	2,6	13,0
	Gennemsnit	1,4	2,4	8,7

Det observeres ud fra tabel 3.4, at geonet T3 opnår den mindste deformation, hvorfor det også er det geonet, som giver den største forøgelse af styrken. Den største forbedring med geonet indlagt observeres ved en lagtykkelse på 30 cm stabilt grus. Den er i gennemsnit 8,7 gange bedre end den uarmerede tilstand ved geonet T3. Geonet T3 er også det geonet med den største styrke jf. tabel 3.3. Forsøgsresultaterne viser, at jo tykkere et bærelag, jo bedre fordeling af spændingerne fra belastningen, som resulterer i en større bæreevne. Forsøget har vist, at geonet har en gavnlig effekt på styrken af bærelaget og tykkelsen på bærelaget har effekt på geonettes indvirkning. Geonettets styrke har også stor indvirkning på resultatet.

3.4 Komplet vejopbygning med geonet

Dette forsøg er udført i USA og artiklen er udgivet af Abu-Farsakh og Chen (2011). Forsøget minder om studiet i afsnit 3.3. Forskellen er, at der er testet på en komplet vejopbygning. Forsøget har til formål, at undersøge den største styrkeforøgelse ved geonet, som afhænger af placering og typen af geonet. Testboksen fremgår af figur 3.10 og forsøgsopstillingen af figur 3.11.

Figur 3.10: Laboratorie testboks til fuldskalaforsøg med hydraulisk aktuator og et reaktionssystem, som måler deformationen og trykket i flere forskellige afstande fra belastningen. (Abu-Farsakh og Chen, 2011).



Figur 3.11: Forsøgsopstillig med dimensioner (Abu-Farsakh og Chen, 2011).

Til forsøgsopstilligen er der anvendt, HMA asfalt, som står for højmoduls asfalt, ubundet bærelag, planum, biaksial og triaksial geonet specifikationerne på materialerne fremgår af tabel 3.5.

Tabel 3.5: Dimensioner og specifikationer på materialer til forsøgsopstilling (Abu-Farsakh og Chen, 2011).

Planum	
Siltprocent	72 %
Lerprocent	19 %
E-modul	5 MPa
Ubundet bærelag	
Knust kalkstens materiale	
100% gennemfald	37,5 mm
92% gennemfald	19 mm
61% gennemfald	4,76 mm
D_{50}	3,126 mm
D_{10}	0,385 mm
Tørdensitet, $p_{d,max}$	2,247 $\mathrm{t/m^3}$
HMA asfalt	
Grusfraktioner, sandfraktion, finstof	
Lagtykkelse	19 mm
Biaksial geonet	
Maskestørrelse	25 x 33 mm
Maskestivhed	3,2/6,5 $\mathrm{kg-cm/grad/m^2}$
Maksimal trækstyrke	4,1/6,6 & 6,0-9,0 kN/m
Triaksial geonet	
Maskestørrelse	40 x 40 x 40 mm
Maskestivhed	3,6/7,8 $\mathrm{kg-cm/grad/m^2}$
Maksimal trækstyrke	8,6/9,5 kN/m
Udstyr	
Pladetykkelse	24,4 mm
Pladediameter	305 mm
Belastning	40 kN
Kontakttryk	0,55 MPa
Belastningsfrekvens	0,77 Hz

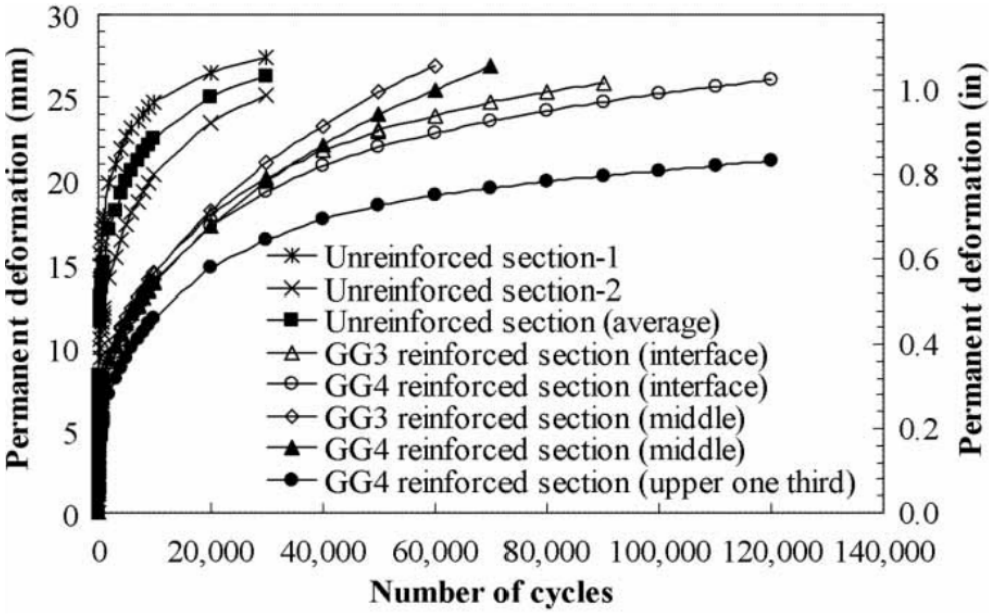
Resultaterne fra de cykliske pladebelastningsforsøg fremgår af tabel 3.6. I forsøgene er placeringen af geonet varieret.

Tabel 3.6: Cykliske pladebelastningsresulat, udført med 40 kN, på en underbund på 5 MPa. Resultat viser en TBR-værdi[a], den beregnede lagtykkelse[b], og målte lagtykkelse[c] (Woon-Hyung et al., 2006).

				Deformationsdybde = 19,1 mm	
	Placering af geonet	Ubundet bærelag	HMA	Cyklus	TBR[a]
	-	[mm]	[mm]	nr.	-
Uarmeret 1	-	305[b]	51[b]	1.601	-
Uarmeret 2	-	323[c]	52,8[c]	7.536	-
Gennemsnit	-	-	-	3887	1,0
Biaksial 1	Grænseflade	319[c]	60[c]	21.482	5,5
Biaksial 2	Grænseflade	317,5[c]	55,6[c]	23.628	6,1
Triaksial 1	Grænseflade	325[c]	56[c]	24.872	6,4
Triaksial 2	Grænseflade	311[c]	57[c]	28.735	7,4
Triaksial 1	Midt	305[c]	57[c]	22.952	5,9
Triaksial 2	Midt	302[c]	59[c]	26.681	6,9
Triaksial 2	Øverste tredjedel	310[c]	57[c]	59.560	15,3

Resultaterne viser, at styrken ved anvendelse af geonet kan forøges og deformationerne ved gentagende cykliske belastninger kan mindskes ved indlæggelse af geonet. TBR-værdien, som er forskellen fra den uarmerede til den armerede opbygning, opnår en armeringseffekt på 15, ved en spordybde på 19 mm. Dette er på en forsøgsoptilling på 305 mm bærelag på svag underbund. Forsøgsresultaterne viser også, at de triaksiale geonet opnår bedre styrke end de biaksiale geonet.

Et af forsøgsresultaterne fra de cykliske pladebelastning med et triaksial geonet med varierende placering fremgår af figur 3.12.



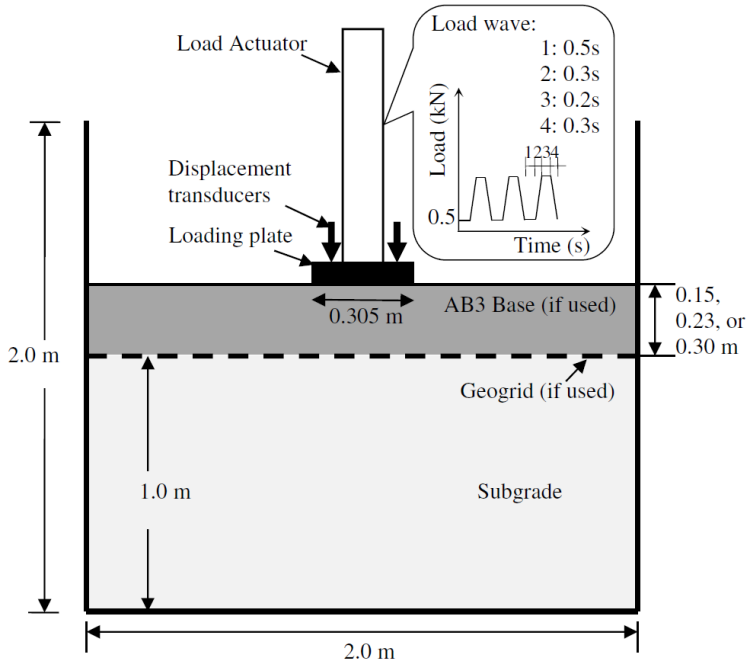
Figur 3.12: Permanent deformationer for to forskellige typer af triaksial geonet placeret i forskellige beliggenheder. GG3 og GG4 er begge triaksial geonet, jf. figur 3.5 (Abu-Farsakh og Chen, 2011).

Det kan observeres på graferne, at triaksial geonet, som er placeret i den øverste tredjedel, kan modstå helt op til 120.000 cyklus modsat den uarmerede tilstand, som kan opnå 30.000 cyklus til

en deformation på 27 mm. Ved at placere geonettet i midten, opnås der helt op til 70.000 cyklus før deformationen på 27 mm opnås. Der er derfor en forbedring på 50.000 cyklus ved at placere geonettet i grænsefladen mellem planum og det ubundne bærelag eller i den øverste tredjedel af bærelaget. Ligeledes opnås den mindste deformation ved triaksial geonet.

3.5 To triaksiale geonet testet på blød bund

Studierne af Sun et al. (2018, 2015) belyser brug af to triaksiale geonet, som normalt anvendes i blødbundsområder under anlægsfasen. Der regnes med ækvivalente lagtykkelser efter, hvor mange cyklus der skal til for at opnå permanente deformation på henholdsvis 12,5, 25 og 50 mm. Ud over to geonet laves kontrolforsøg, hvor der testes på opbygning med knuste kalksten, AB3, med en højde på 0,15, 0,23 og 0,3 m oven på geonet, der ligger direkte oven på en underbund bestående af bl.a. 75% sand fra en flod, hvis styrkeparametre ligger indenfor en blød underbund der varierer mellem 29 og 95 MPa. Forsøgsopstillingen fremgår af figur 3.13.



Figur 3.13: Forsøgsopstilling af Sun et al. (2018).

Studierne tester på to forskellige triaksiale geonet, hvis styrkeparametre fremgår af 3.7.

Tabel 3.7: Styrkeparamtre og dimensioner for de to triaksiale geonet anvendt i studierne af Sun et al. (2018, 2015).

	T1	T2
Ribbe tykkelse [mm]	0,9-1,3	1,3-2,0
Ribbe længde [mm]	40 x 40 x 40	40 x 40 x 40
Radial stivhed (ved 0,5% stræk) [kN/m]	270	365

Studierne har beregnet en ækvivalent lagtykkelse ved forskellige kontakttryk og ved opbygninger med geonet og uden geonet. Her observeres styrkeforøgelse på 30-85% ved brug af geonet på blød bund. Samtidig er en konklusion, at det nødvendige antal cyklusser for en given deformation stiger logaritmisk, når underbunden stiger fra 29 til 95 MPa.

Ved udførelse af forsøg er der påført forskellige kontakttryk. Her observeres det, at den procentvis forbedring ved indlæggelse af geonet er større ved et større kontakttryk, hvilket formentlig hænger sammen med, at det højere tryk øger styrken af forkillingseffekten på geonettet. Et udsnit af resultaterne er vist i 3.8

Tabel 3.8: Et udsnit af resultaterne fra studierne af Sun et al. (2018, 2015) ved en opbygning med 0,23 m AB3 og den dertilhørende styrkeforøgelse ved forskellige kontakttryk.

Kontakttryk [MPa]	0.138	0.345
Uden geonet	-	-
Med geonet (T1)	13%	22%
Med geonet (T2)	23%	39%

Tabellen viser dermed, ligesom konklusionen i studiet, at der opnås en større forskel mellem den armerede og uarmerede tilstand ved et større kontakttryk.

3.6 Erfaring med reducering af grusbærelag

Visser et al. (2017) undersøger brugen af det triaksiale geonet TX160 indlagt på ti strækninger på skovveje, hvilket er veje uden asfalt, i New Zealand. Vejene bliver undervejs belastet af lastbiler, som fremgår af figur 3.14.

Figur 3.14: Lastbilerne vejen belastes af i en tidsperiode på et år (Visser et al., 2017).

Bæreevnen af vejopbygningerne testes på strækninger med geonet indlagt mellem bundsikring og stabilt grus samt kontrolstrækninger. Konklusionen på deres test er, at det ikke opnås forskel ved indlæggelse af geonet efter et år med lastbiltrafik. Der er yderligere testet på en strækning hvor lagtykkelsen på stabilt grus er reduceret med 50-100 mm. Resultaterne fra denne strækning viser, at der ingen bæreevneforringelse opnås, hvorfor det er muligt at indlægge geonet til besparelse af stabilt grus. Studiet beskriver derfor, at der er et potentiale for at reducere lagtykkelsen. Studiet slår fast, at hvis stabilt grus er tilgængeligt og billigt, vil det være oplagt at tilføje den ekstra tykkelse i stedet for at anvende geonet. (Visser et al., 2017)

3.7 Vejregler national og international

Der er søgt efter litteratur, omkring indbygning af geonet, i danske, svenske, norske og amerikanske vejregler. I de svenske vejregler, Trafikverket, findes der ingen vejledning eller beskrivelse af geonet i vejopbygningen. I de danske vejregler er geonet kun nævnt i forhold til stabilitet og sikring af skråninger. Vejregelgruppen jord, grus og brolægning (2018) nævner specifikt, at geonet normalt ikke øger bæreevnen af en vejopbygning.

I de norske vejregler, Statens Vegvesen, er geonet nævnt i flere vejledninger og normaler.

Statens Vegvesen (2022b) nævner, at geonet i flere tilfælde kan øge bæreevnen i vejopbygninger. Derudover anvendes geonet ofte ved stabilisering af skråninger og til reducering af ujævnheder og deformationer. Statens Vegvesen (2011) beskriver, at forstærkning, i form af geonet, ved en underbund med lav bæreevne, kan reducere bundsikringslaget. Det beskrives ligeledes i vejreglen, at lagtykkelsen af stabilt grus normalt ikke kan reduceres ved indlæggelse af geonet. Ofte anbefales det, at kombinere geonet med en fiberdug/seperationsdug for at undgå sammenblanding af planum og bundsikringslaget. Normen N200 af Statens Vegvesen (2022a) beskriver, at hvis der udføres armering under fyldninger skal det dokumenteres, at spændingerne i opbygningen tilstrækkelige.

De amerikanske vejregler U.S. Department of Transportation (2021) anbefaler, at geonet placeres i grænsefladen mellem planum og bundsikring. Der er ikke helt specifikke standarder for, hvor og hvornår geonet med fordel kan indlægges. Det beskrives af U.S. Department of Transportation (2018), at der ved indlæggelse af geonet, skal det vurderes af en geotekniker og godkendes af vejmyndigheden. Vejmyndigheden kan på nuværende tidspunkt ikke godkende, at geonet reducerer lagtykkelsen i vejkassen. U.S. Department of Transportation har udgivet studier om brugen af geonet i vejopbygningen, hvor der er udført forsøg, som er testet med statisk og cyklisk pladebelastning. Forsøg har vist, at geonettet har en stor effekt på bæreevnen.

Studiet af (Huntington og Ksaibati, 2000) er nævnt i de amerikanske vejregler. Der udføres test på et traditionelt ubundet bærelag og et reduceret ubundet bærelag, hvor geonet er indlagt som kompensation for reduceringen. Opbygningerne blev testet med faldlod, spormålninger og en visuel observation af tilstanden. Der konkluderes ud fra studiet, at der opnås samme styrke i en opbygning med 43 cm ubundet bærelag, som en opbygning på 28 cm bærelag og et biaksial geonet. Derved viste studiet en reduktion af det ubundne bærelaget op til 15 cm ved anvendelse af biaksial geonet.

U.S. Department of Transportation (2008) anbefaler, at maskestørrelsen skal være større end D_{50}, hvilket svarer til den kornstørrelse, hvor der er 50% gennemfald, med en minimumstørrelse på 13 mm. Samtidig anbefales det, at maskestørrelsen er mindre end det dobbelte af D_{85}, med en maksimal kornstørrelse på 76 mm. Den anbefalet kornstørrelse skal sikre låseeffekten, så de vertikale kræfter overføres til det horisontale geonet.

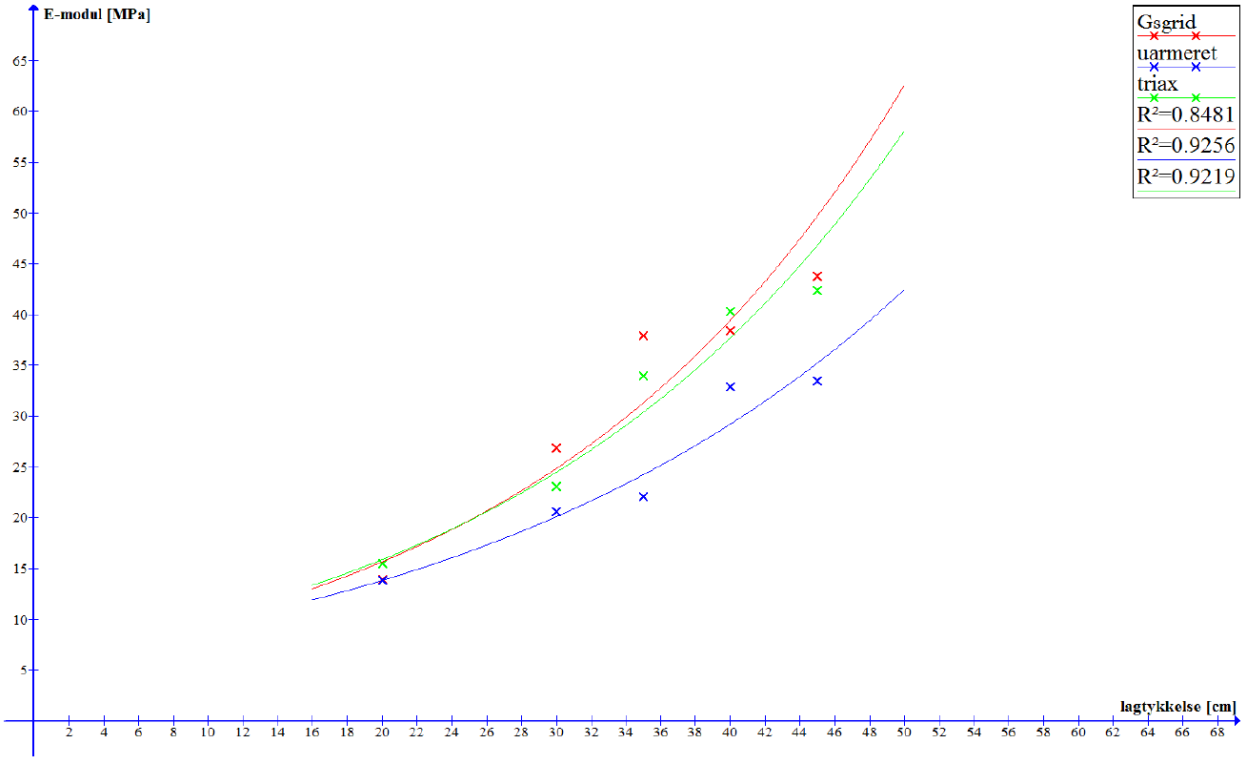
3.8 National litteratur

Vanggaard og Baltzer (2003) tester forsøg med geonet indlagt i mellem planum og 500 mm stabilt grus. Det anvendte geonet er et triaksial, Tensar SS30. Testene er udført på forskellige lokaliteter, såsom en parkeringsplads, en lagerplads og i en gulvopbygning. Bæreevnen og indbygning af geonet testet med statisk pladebelastning og faldlod. Resultaterne viser, at der er en forøgelse af bæreevnen ved indbygning af geonet oven på svagt ler og stabilt grus. Forøgelsen af stivheden er fra den uarmerede situation 5 MPa til indlæggelse af geonet en stivhed 10-20 MPa. Hvilket giver en armeringseffekt på 2-3. Der er yderligere testet, at der ved indlæggelse af geonet oven på komprimeret bundsikring umiddelbart ikke opnås en bæreevneforøgelse.

Et internt notat af Baltzer (2005) forklarer et forsøg, hvor der er indlagt geonet på en forsøgsstrækning på Hirtshals motorvejen, hvor geonet blev indlagt mellem bundsikring og stabilt grus. Dette forsøg viste umiddelbart ingen bæreevneforøgelse, grundet den stærke vejopbygning med planum af sand. Hvilket må formodes, at være fordi underbunden ikke deformeres og derved opnår der ved belastning af vejen, intet træk i geonettets maskestruktur. Ifølge notatet, skulle geonettet have lagt mellem bundsikring og underbund, hvorfor der ville have været mere træk i geonettet.

3.9 Studenterprojekter

Der er i Aalborg universitets bibliotek fundet studenterprojekter der beskriver, at geonet har potentiale for at øge vejens levetid og bæreevne. Et enkelt studenterprojekt er fundet relevant, at sammenligne med i forhold til projektets problemformulering. Brodersen og Nielsen (2011) beskriver, hvordan de har sammenlignet stive geonet i form af biaksial SS30 med triaksial TX160 geonet fra Byggros. Geonet blev testet indlagt i en traditionel vejopbygning i et forsøgsområde i Holbæk med postglacial tørv og gytje som planum. Projektet undersøger testfelter med minifaldlod. Test af geonet i finsand viste ingen styrkemæssig forøgelse, hvorfor det konkluderes, at der ikke kunne opnås den ønskede forkilingseffekt med et finkornede materiale. Der er efterfølgende testet på indlæggelse af geonet i bundsikringsgrus. Her opnås en styrkemæssig forøgelse, der er testet i lagtykkelser på 30, 35, 40 og 45 cm. Effekten er størst ved det triaksiale geonet TX160, hvor bæreevnen forøges med omkring 30% i forhold til kontrolforsøget. Resultaterne fra projektet fremgår af figur 3.15



Figur 3.15: Resultaterne med E-modul som funktion af lagtykkelsen med bundsikringsgrus i projektet af Brodersen og Nielsen (2011).

Det fremgår af figuren, at den potentielle reduktion i bundsikringsgrus bliver større i takt med en større lagtykkelse.

Et andet relevant studenterprojekt af Vestergaard et al. (2021) beskriver vejopbygning på blød bund (E_u>5 MPa), og hvordan bundsikringslaget potentielt kan reduceres med omkring 200 mm ved indlæggelse af to triaxiale geonet, med placering oven på planum og oven på bundsikring. Reduktionen er beregnet ud fra designdiagrammer fra producenten Byggros, men fordi Byggros ikke stiller garanti for denne beregnede reduktion, så er det stadig op til den enkelte bygherre at vurdere, om materialebesparelsen er risikoen værd. Projekt bekræfter nødvendigheden for yderligere undersøgelser af materialebesparelsen ved indlæggelse af geonet.

3.10 Opsummering på litteraturstudiet

Studiet, i afsnit 3.2, har en testopbygningen lignende den fra dette speciale. Det betyder, at de har udført forsøgene i en firkantet beton bygning, med en trækasse på toppen, på en underbund af sand, simuleret blød bundmed ekspanderet polystyren, med et E-modul på 7 MPa og testet med grus, sammenligneligt med stabilt grus. De har ligeledes belastet med en hydraulisk aktuator, som der også er anvendt i dette speciale. Aktuatoren er anvendt til cyklisk pladebelastning. I studiet i afsnit 3.3, er er anvendt en sammenlignelig forsøgskasse. Der er i dette studie testet på en underbund med et E-modul på 16-20 MPa, i en opbygning på 100 cm og en varierende lagtykkelse af stabilt grus. I dette studie har de testet tre triaksiale geonet og ligeledes udført cyklisk pladebeastningsforsøg. Studiet i afsnit 3.4 anvender samme forsøgskasse. Dette studie har testet på en komplet vejopbygning derved belagt med asfalt. De har testet på en underbund med 5 MPa bestående af ler og silt, og har anvendt knust kalkstenmateriale til det ubundne bærelag. De har udført cyklisk pladebelastningsforsøg på opbygningen for at sammenligne den uarmerede situation med den armerede ud fra deformation. Studiet gennemgået i afsnit 3.5 har igen samme forsøgskasse og anvendt en blød underbund, med et E-modul fra 29-50 MPa. Det ubundne bærelag er i dette tilfælde knuste kalksten. Der er testet på forskellige opbygninger på 0,15, 0,23 og 0,3 m. Der er i dette studie testet to forskellige triaksiale geonet. Dette giver grundlag for at kunne sammenligne resultaterne eftersom de er udført ud fra samme opbygning. Materialer og geonet er dog forskellige. Af tabel 3.9 fremgår et overblik over parametre benyttet i fire essentielle videnskabelige artikler.

Tabel 3.9: Overblik over parametre anvendt i fire essentielle videnskabelige artikler gennemgået i litteraturstudiet.

Artikel	**3.2**	**3.3**	**3.4**	**3.5**
Kilde	(Woon-Hyung et al., 2006)	(Qian et al., 2013)	(Abu-Farsakh og Chen, 2011)	(Sun et al., 2015)
Underbund type	0,45 m EPS og 2,5 m sand	75% flodsand og 25% koalin	72% silt og 19% ler	75% flodsand og 25% koalin
Underbund E-modul	7 MPa	20 MPa	5 MPa	30 MPa
Belastningstryk	0,7 MPa	0,55 MPa	0,55 MPa	0,07-0,55 MPa
Belastningsplade D	250 mm	300 mm	305 mm	305 mm
Antal cyklus	1.000	80, 450, 1.800	30.000-120.000	1.000
Cyklisk frekvens	1 Hz	0,77 Hz	0,77 Hz	0,77 Hz
Bærelag	Stabilt grus	Stabilt grus	Knust kalksten og HMA	Stabilt grus
Højde af bærelag	300 eller 460 mm	150, 230 eller 300 mm	305 og 51 mm	150, 230 eller 300 mm
Opbygning type	Beton- og trævægge	Stor geoteknisk boks	Ståltestboks	Stor geoteknisk boks
Størrelse (LxBxH)	3x3x3,5 m	2,2x1x1 m	2x2x1,7 m	2x2x1,3 m
Geonet type	Biaksial	Triaksial	Bi- og triaksial	Triaksial
Antal geonet	1	3	4	2
Armeringseffekt, TBR	-	1,0-13,0	5,5-12,1	1,3-2,4

I studiet af Vanggaard og Baltzer (2003), fremgår det, at der er udført test på en blød bund i en mindre flytbar testboks. Her er der testet på blød bund af svagt ler og geonet er lagt i stabilt grus og

bundsikringssand for sammenligning. Her er E-modulet øget fra 5 til 10-20 MPa, ved indlæggelse af triaksial og biaksial geonet.

Et studenterprojekt af Brodersen og Nielsen (2011) udføres i felten, hvor geonet er testet indlagt i bundsikringsgrus på en underbund af tørv og gytje med et E-modul på under 5. Her opnås en bæreevneforøgelse på 30% og en ekspotentiel funktion af deres forsøgsresultater.

Denne brede vifte af litteratur giver projektet et grundlag for at kunne sammenligne forsøgsresultater og erfaringer. Ud fra studierne observeres en styrkeforøgelse ved geonet implementeret i det ubundne bærelag, eftersom der observeres en bæreevneforøgelse og derved et potentiale for materialebesparelse.

4 Vejdirektoratets erfaring med geonet

I det følgende er der interviewet to fagpersoner fra Vejdirektoratet. Vejdirektoratet er ansvarlig for det danske statsvejnet. Dette indebærer blandt andet ansvaret for motorveje, en række landeveje og broer, som gør Vejdirektoratet til en stor bygherre indenfor den danske vejsektor. Derfor har interviewet til formål, at belyse Vejdirektoratets erfaringer og holdning til at anvende geonet i vejopbygningen.

Den ene af de to respondenter er, Finn Thøgersen, fra afdelingen Befæstelser, som til dagligt arbejder med vejens opbygning fra bund til top. Derfor har han stor erfaring med materialer som anvendes i vejopbygningen. Yderligere er Finn Thøgersen formand for vejregelgruppen Ubundne materialer.

René Hvidbak Sørensen, den anden respondent, fra afdelingen entreprisestyring, hvor han til dagligt fungerer som vejfaglig koordinator for bundne belægninger. Ligeledes er han medlem af vejregelgruppen Asfalt.

De fortæller begge, at Vejdirektoratet ikke har de store erfaringer med at anvende geonet i de ubundne lag. Ifølge dem anvendes geonet ikke i særlig stor grad i de ubundne bærelag i Danmark. De har tidligere lavet forsøg, hvor de har anvendt geonet i det ubundne bærelag. I 2003 stillede Vejdirektoratet en forsøgsstrækning tilrådighed. Denne forsøgsstrækning og resultaterne herfra fremgår af afsnit 3.7.

Finn Thøgersen og René Hvidbak Sørensen er spurgt ind til deres procedure hvis de anlægger vej på blød bund, hvortil de svarer.

Normalt graver vi det væk i det omfang det er nødvendigt og efterfølgende erstattes dette med andre fyldmaterialer. Det kommer selvfølgelig an på hvor meget og hvor dybt blød bunden er placeret.

Det er ifølge Finn Thøgersen blevet vurderet, at kalkstabilisering ved lerjord giver en bedre effekt end for eksempel at anvende geonet. Blandt andet fordi geonet er meromkostning og det er besværligt efterfølgende at grave i vejkassen, hvorfor det også kan give udfordringer for ledningsejere. Derudover er det ikke altid muligt at kalkstabilisere andre jordarter end ler, hvorfor de ofte graver denne blød bund væk.

Ifølge René Hvidbak Sørensen er Vejdirektoratet begyndt at anvende asfaltarmering for at mindske revnedannelser i vejen, men de anvender normalt ikke geonet i de ubundne materialer. Begge respondenter er enige om, at de er usikre på, om prisen på geonet i asfalten er den ekstra levetid værd.

Vejdirektoratet har ikke fundet det nødvendigt at undersøge muligheden for at anvende geonet i det ubundne bærelag. Ifølge dem er råstofmanglen først nu begyndt at være en udfordring, herunder særligt i hovedstadsområdet. Respondenterne udtaler, at transport af råstoffer er en stor andel af den samlede omkostning, hvorfor råstofferne i sig selv stadig er relativt billige. Derfor kan det godt være relevant for Vejdirektoratet at undersøge muligheden for anvendelse af geonet, hvis det bliver nødvendigt at transportere råstoffer over længere afstande eller, hvis der er mulighed for materialebesparelse, hvortil Finn Thøgersen udtaler:

Hvis det, at indlægge et geonet kan gøre, at der for eksempel kan spares 10 cm grus, så er det da værd

at kigge på. Men igen, det er hele tiden en afvejning mellem økonomi og tilgængelighed. Derfor var det tidligere en ren økonomisk afvejning, men i dag, er der andre faktorer, som vi efterhånden kigger mere på. Det er klima, $\mathrm{CO_2e}$ *og miljø. Disse faktorer skal opvejes og derudfra skal der findes den bedste løsning, for det koster også noget at fremstille et geonet.*

Ifølge Finn Thøgersen, vil de i fremtiden afveje deres valg af løsninger både på udledning af $\mathrm{CO_2e}$ og økonomi, hvor de før havde økonomi som den vigtigste parameter. Derfor kan de godt finde på at vælge en løsning med geonet hvis den er bedre ift. udledning af $\mathrm{CO_2e}$ end evt. bortskaffelse af blød bund.

Både Finn Thøgersen og René Hvidbak Sørensen fortæller, at de ikke arbejder på en vejregel for geonet i det ubundne bærelag. Ifølge dem, er det en udfordring med manglende erfaring på området og at vejregler skal være produktneutrale.

4.1 Svar fra Byggros

Efter interview med Vejdirektoratet opstår flere uafklarede spørgsmål, hvorfor det er valgt at stille forhandleren af geonet en række spørgsmål, som branchen ser ved anvendelse af geonet. Spørgsmålene er sendt i en mail, hvor administrerende direktør Anders Kjeld, har givet sit svar på de uafklarede spørgsmål.

Vejdirektoratet ser det som en udfordring, at geonet gør det besværligt for ledningsejere at servicere deres ledninger. Ifølge Anders Kjeld, er det er normalt ikke noget problem at udføre gravearbejde i områder med geonet. Geonettet "klippes"over med gravemaskinen, når skovlen rammer geonettet. Reparation sker ved at indlægge et nyt stykke geonet med et overlæg på 30 cm. Han indrømmer, at det selvfølgelig er det lettere uden geonet.

Til sidst blev Anders Kjeld spurgt om brug af genbrugsplast i geonet. Hertil svarer han, at dette på nuværende tidspunkt ikke er en mulighed, idet styrkeparametrene bliver reduceret. Den store udfordring med genbrugsplast er, at kunne producere det ensartet og indenfor en acceptabel variation. Ifølge deres egen erfaring og forsøg, er det ikke unormalt, at der kan opnås en reduktion på omtrent 30% af CO_2e ved anvendelse af geonet. Dette er selvom geonet i sig selv øger klimaaftrykket.

5 Geonet ifølge Byggros

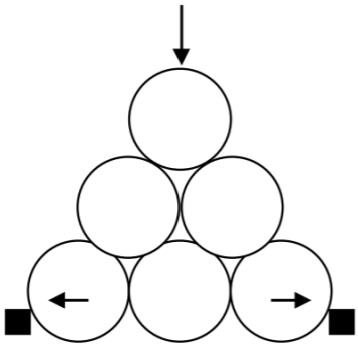
BG Byggros A/S (2023) er en dansk forhandler af specialprodukter til bygge og anlægsbranchen. De forhandler blandt andet geoarmering og stabiliserende jordarmering. Under denne produktkategori findes geonet, hvor der i dette speciale anvendes typen af plastikmaterialet polypropylen. Virksomheden forhandler bl.a. geonet fra Tensar International Corparation (2023), som er international kendt for blandt andet deres geoarmering. Produktet anvendes til at forstærke jord og andre materialer, som er udsat for belastning og deformationer. Geonet anvendes blandt andet til byggeri og infrastrukturprojekter.

Formålet ved geonet er, at stabilisere jord og opnå en bæreevneforøgelse i forhold til en uarmerede situation. Den øgede bæreevne kan give anledning til en forlængelse af vejens levetid eller reducering af vejopbygningens lagtykkelser. Dette kan resultere i en materialebesparelse, som potentielt kan reducere udledningen af CO_2e og være materialebesparende. (BG Byggros A/S, 2023)

Geonet beskrives af Byggros, til at have følgende gunstig effekt ved indlæggelse,

- Mulighed for reducering af bærelaget
- Forlængelse af levetid på opbygningen
- Øget bæreevne af opbygningen
- Reduktion af sætninger i planum

Geonettet opnår sin gunstige effekt ved, at grusmaterialer forkiles i maskestrukturen. Herved opstår et mekanisk lag, som giver anledning til en bæreevneforøgelse. Princippet fremgår af figur 5.1.



Figur 5.1: Forkiling af grusfraktioner i maskestruktur (BG Byggros A/S, 2023).

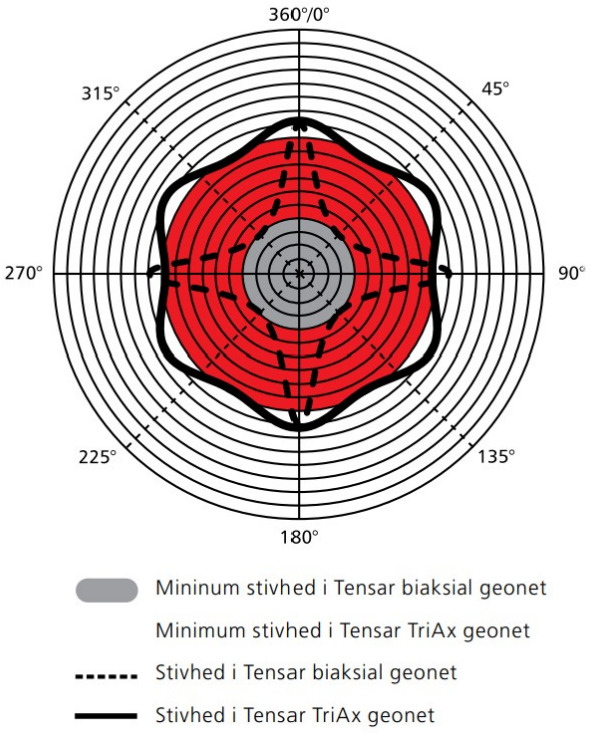
For at opnå denne forkiling og dermed det mekanisk lag, er der specifikke krav til grusmaterialet. Grusmaterialerne skal have en karakteristisk friktionsvinkel på >35 ° og kornstørrelser i intervallet 0-32 mm. Kvaliteten af grusmaterialet har indvirkning på det endelige målte E-modul. (BG Byggros A/S, 2023)

Byggros har designdiagrammer for specifikke geonet, der fungerer som vejledning til indbygning og reducering af materialer. Virksomheden vil ikke garantere en bestemt effekt ved indlæggelse af geonet. Designdiagrammerne er baseret på virkelige forsøg.

5.1 Betydning af geonettes udformning

Geonet forhandles i forskellige udformninger og styrke. I det følgende er der valgt at sammenligne den bi- og triaksiale maskestruktur.

Udviklingen af geonet viser, at triaksial geometri opnår en større styrkeforøgelse end den biaksiale geometri. Byggros har visuelt vist forskellen målt ved trækstyrken i et diagram, som fremgår af figur 5.2



Figur 5.2: Trækstyrken sammenlignet i biaksial og triaksial geonet over 360 °, hvor triaksial næsten opnår isotopiske egenskaber (BG Byggros A/S, 2023).

Geonet viser ved feltforsøg, at den øget stivhed og forkiling af grusfraktioner resulterer i en større tryksprednin og dermed en større bæreevne. Ligeledes er formodningen, at den triaksiale geometri resulterer i en stærkere forkiling og dermed en større bæreevne. Derfor er det virksomhedens klare formodning, at det er en fordel at anvende triaksiale geonet frem for det biaksiale. (BG Byggros A/S, 2023)

5.2 Anbefaling til indlæggelse

Ved indlæggelse af geonet i vejopbygninger har Byggros en række anbefalinger, som sikrer størst mulig bæreevneforøgelse.

- Dæklagstykkelse udlagt oven på geonettet bør være 3 gange kornstørrelsen. Byggros anbefaler en minimumtykkelse på 20 cm over geonet, for at sikre en stabiliseringseffekt.
- Udførsel af pladebelastningsforsøg før og efter indlæggelse.

Det er ifølge Byggros fordelagtigt, at der udføres forsøg med pladebelastning på opbygningen, for at kontrollere E-modulet før og efter indbygning af geonet. Derfor kontrolleres E-modulet på

oversiden af planum før indlæggelse og oversiden af bærelaget efter indlæggelse af geonet. (BG Byggros A/S, 2023)

Overflade E-modulet definerer en dimensioneringsgivende trafikklasse. Byggros har inddelt overflade E-modulets størrelse i belastningsklasser, som fremgår af tabel 5.1.

Tabel 5.1: Belastningsklasser efter overflade E-modul på det ubundne bærelag. (BG Byggros A/S, 2023)

Overflade	Anvendelsesområde	Belastningsklasse
$E_o = 30$ MPa	Begrænset belastning Cykelstier og midlertidige byggeveje	1
$E_o = 45$ MPa	Større belastning Markveje og midlertidige byggeveje	2
$E_o = 60$ MPa	Let trafik - maksimalt akseltryk 6t Vilaveje og ligende, parkkeringsarealer for personbiler	3
$E_o = 80$ MPa	Middel trafik - maksimalt akseltryk 8t Middel trafikerede veje, parkeringsarealer, flydende gulv i lagerhaller	4
$E_o = 120$ MPa	Tung trafik - maksimalt akseltryk 12t Tung trafikerede veje, hovedveje og motortrafikveje, parkeringsarealer, contrainerpladser	5
$E_o = 150$ MPa	Svær tung trafik - maksimalt akseltryk 15t Parkeringsarealer for meget tunge køretøjer, containerpladser, landingsbaner og lign.	6

Byggros anbefaler, at indbyrdes geonet indlægges med minimum 30 cm overlæg. Hvis de ubundne materialer overstiger en lagtykkelse på 50 cm, kan det med fordel overvejes at indlægge flere lag geonet. Dette er en række anbefalinger fra BG Byggros A/S (2023), som skal sikre den bedste bæreevneforøgelse ved indlæggelse af geonet. Anbefalingerne vil blive medtaget i dette speciale under udførelsen af fuldskala laboratorieforsøg. Derudover vil formodningen om, at den triaksiale geometri er bedre til at optage spændingerne blive testet ved sammenligning med den biaksiale geometri.

6 Materialeparametre

I dette speciale testes et fuldskalaforsøg med bi- og triaksial geonet fra Byggros på blød bund. I det følgende vil anvendelsesmuligheden af ekspanderet polystyren, EPS, som simuleret blød bund blive testet. Derudover præsenteres det ubundne bærelag, stabilt grus, og de anvendte geonet med deres specifikationer.

6.1 Ekspanderet polyesteren

Til fuldskala laboratorieforsøg er der anvendt EPS, også kendt som flamingo, som skal simulere blød bund. I det følgende, vil materialeparametrene fremgå. Produkterne der er anvendt, er af mærket Jackon Jackopor. Der er indledningsvist testet på flere forskellige typer af EPS, for at sikre to forskellige blød bund med variation i E-modulet. Fremgangsmåden til bestemmelse af E-modulet fremgår af figur 6.1.

Figur 6.1: Test af EPS-pladernes E-modul ved statisk pladebelastning.

Det er valgt at anvende EPS 60 og EPS 250, som er yderpunkter i produktporteføljen, hvilket resulterer i den størst mulige forskel i E-modul. Jackon (2023) oplyser følgende E-modul og en trykstyrke, som vist i tabel 6.1. Underbunden er navngivet efter trykstyrken, som angiver det maksimale tryk materialet kan modstå ved sammenpresning, før der opstår brud.

Tabel 6.1: Jackopor specifikationer for henholdsvis EPS 60 og EPS 250 opgivet af producenten Jackon (2023).

Jackopor EPS-plader		
Type	EPS 60	EPS 250
E-modul [MPa]	2,0	7,5
Trykstyrke [kPa]	60	250

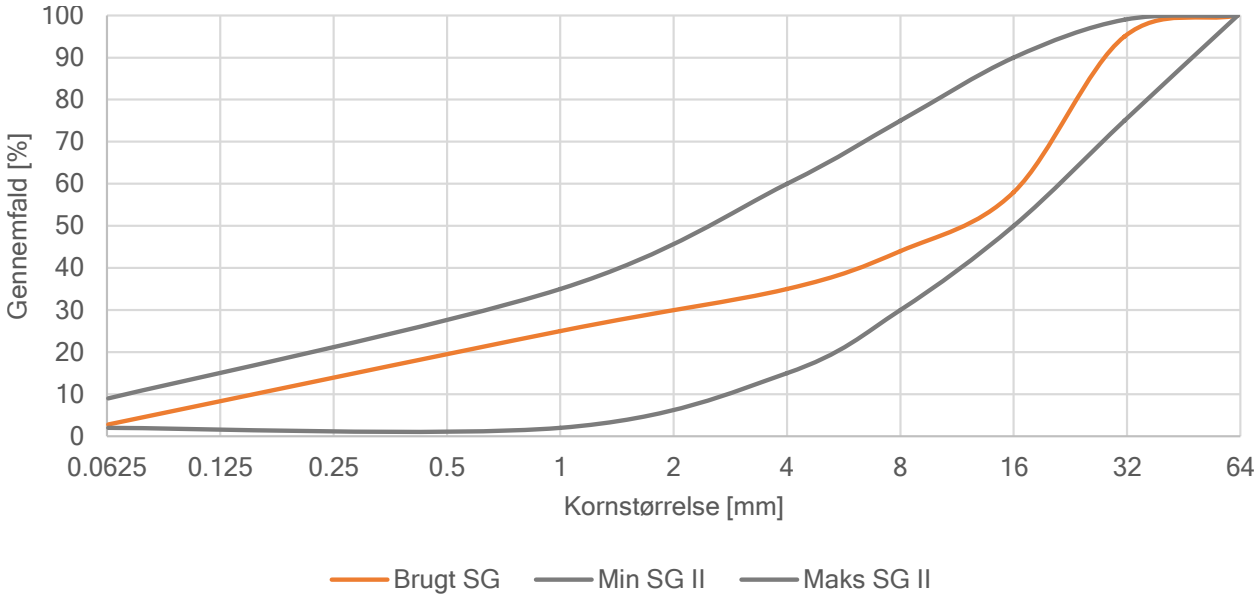
6.2 Stabilt grus

Stabilt grus II anvendes til det ubundet bærelag. For at sikre styrken af stabilt grus, er der dokumenteret geotekniske undersøgelser af materialet. Dokumentation er nødvendig for at opnå korrekt komprimering, styrke og forkiling i geonettet. leverandøren har dokumenteret det anvendte stabilt grus, jf. tabel 6.2, hvor tørdensiteten er bestemt med vibrationsforsøg jvf. Dansk Standard (2003). Laboratorierapporterne fremgår af appendiks A.

Tabel 6.2: Specifikationerne for stabilt grus, yderligere værdier fremgår i appendiks A.

Stabilt grus II	
Opt. vand, w_{opt}	6-7,4 %
Tørdensitet, $P_{d,maks}$	2,11 t/m^3
E-modul	300 MPa

For at sikrer de rette kornstørrelser i stabilt grus II, har leverandøren udført en sigteanalyse. Denne analyse sikrer den rette komprimering og bæreevne. Analysen fremgår af figur 6.2, som viser, at materialet ligger indenfor grænserne af stabilt grus II.



Figur 6.2: Sigteanalyse udført af stabilt grus fra Nysum Grusgrav og analysen er udført af Colas. Resterende geotekniske specifikationer fremgår i appendiks A.

Kvaliteten er en vigtig parameter for at opnå det mekaniske lag, som sikres ved at grusfraktionerne låses i maskestrukturen af geonettet.

6.3 Komprimering

For at komprimere stabilt grus er der anvendt en pladevibrator. Pladevibratoren er vist på figur 6.3 og specifikationerne fremgår af tabel 6.3.

Figur 6.3: Pladevibrator (Evolution, 2023).

Tabel 6.3: Tekniske specifikationer for Hulke-lectro pladevibrator (Evolution, 2023).

Tekniske specifikationer	
Motor	780 W
Hastighed	5 m/min
Komprimeringskraft	5 kN
Plade areal	400 x 320 mm
Vibration	7,43 m/s^2
Vægt	26 kg

6.4 Anvendte geonet

Det ønskes at teste på geonet til en belastningsklasse 5, hvilket svarer til et overflade E-modul på 120 MPa, jf. tabel 5.1. Formuleringen af belastningsklasse 5 er antages sammenlignelig med trafikklasse 5, hvilket er dimensioneret til 1.200 tunge køretøjer pr. døgn (Ad hoc-gruppe Vejregelgruppe Dimensionering, 2022).

Biaksial geonet

Der er valgt at anvende et biaksial geonet er af typen B30/30, som anbefales at anvendes til en belastningsklasse 3-5. Geonettet er vist på figur 6.4.

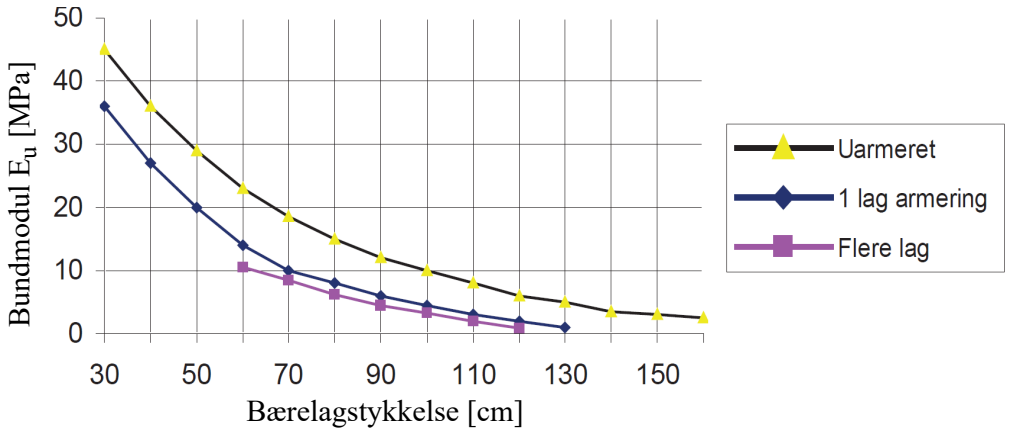
Figur 6.4: Maskestruktur på biaksial geonet.

Biaksial geonet af typen B30/30 har specifikationerne, jf. tabel 6.4.

Tabel 6.4: Dimensioner B30/30 (BG Byggros A/S, 2023).

B30/30	
Dimensioner	
Maskestørrelse	34 x 34 mm
Ribbetykkelse langs/tværs	2,5/1,5 mm
Vægt	0,33 kg/m^2
Mekanisk	
Trækstyrke ved 2% forlængelse	10,5/10,5 kN/m
Trækstyrke ved 5% forlængelse	21/21 kN/m
Maksimal trækstyrke	30/30 kN/m
Maksimal deformation	$\leq 10\%$

Dimensionerne er med til at definere styrken på geonettet. Byggros har lavet et designdiagram, som kan anvendes til reduktion af bærelaget bestemt efter styrken, E-modulet, på planum. Designdiagrammet definerer bærelagstykkelsen ved 1/3 stabilt grus og 2/3 bundsikringssand. Byggros vil ikke garantere en bestemt effekt, derfor skal designdiagrammerne opfattes som en vejledning. Designdiagrammet for B30/30 fremgår af figur 6.5.



Figur 6.5: Biaksial geonet B30/30 - designdiagram belastningsklasse 5 E_o= 120 MPa (BG Byggros A/S, 2023).

Designdiagrammet er for en belastningsklasse 5, med et overflademodul på 120 MPa. Diagrammet illustrerer, en potentiel reduktion af bærelaget med op til 28 cm ved anvendelse af et lag geonet B30/30.

Triaksial geonet

Det er valgt at anvende et triaksial geonet af typen Tensar TriAx TX160. Dette geonet er opbygget af en treakset ribbestruktur. Geonettet anbefales til belastningsklasse 3-6. Maskestrukturen fremgår af figur 6.6.

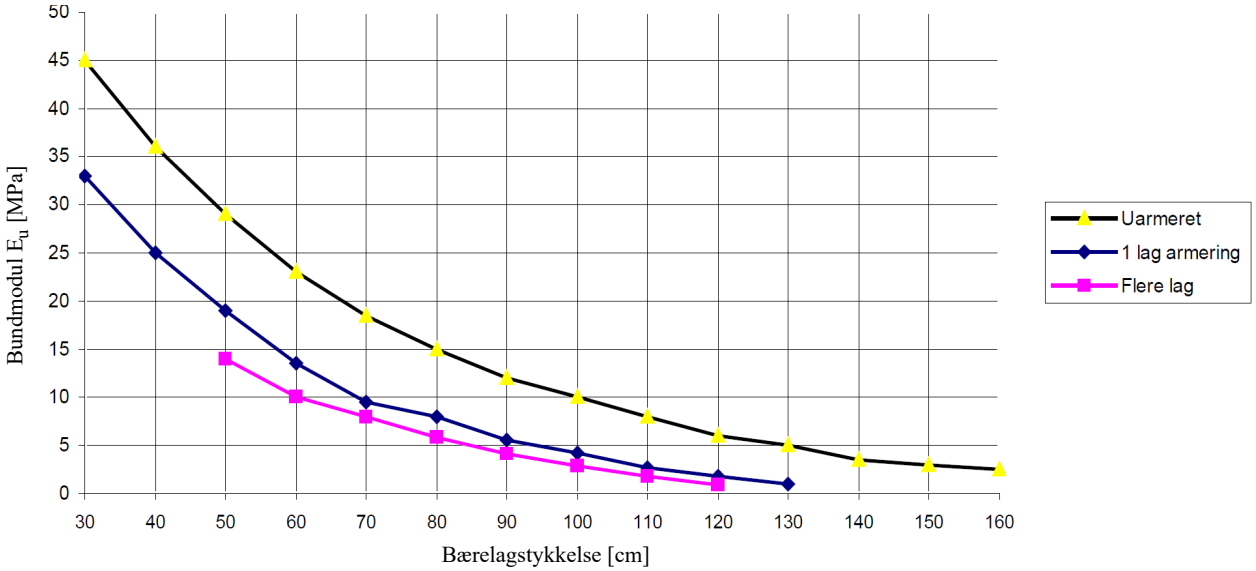
Figur 6.6: Maskestruktur på triaksial geonet.

Specifikationerne for TriAx TX160 fremgår af tabel 6.5.

Tabel 6.5: Dimensioner TriAx TX160 (BG Byggros A/S, 2023).

TriAx TX160	
Dimensioner	
Maskestørrelse	40 x 40 mm
Ribbetykkelse	1,8/1,5 mm
Midterribbe bredde	1,1/1,3 mm
Knudepunkternes tykkelse	3,1 mm
Vægt	0,22 kg/m^2
Mekanisk	
Knudepunkts effektivitet	90%
Maskestablitet N.mm/grad ved 500 N.mm	390
Radial stivhed ved lavt stræk (kN/m ved 0,5% stræk)	455 $\pm$ 50

Specifikationerne er med til at give geonettet sin styrke. I den forbindelse har Byggros udarbejdet en vejledningen for reduktion af bærelaget ved anvendelse af TriAx TX160. Designdiagrammet viser reduktion i bærelagstykkelsen med og uden geonet, afhængigt af styrken på planum. Designdiagrammet fremgår af figur 6.7.



Figur 6.7: Triaksial geonet TriAx TX160 - designdiagram for belastningsklasse 5 E_o= 120 MPa (BG Byggros A/S, 2023).

Ifølge designdiagrammet kan potentielt opnås en reducering af bærelaget op til 30 cm ved indlæggelse af et lag geonet af typen TriAx TX160. Denne reducering skyldes geonettets mekaniske egenskaber, som opstår sammen med grus. Diagrammet er en vejledning fra Byggros, som ikke vil garantere en bestemt reduktion og et øget E-modul, blot vejlede omkring en potentiel materialebesparelse.

De præsenterede materialer er anvendt til fuldskalaforsøg i laboratoriet og ligger til grundlag for resultaterne.

7 Forsøgsbeskrivelse

I det følgende afsnit er forsøgsopstillinger og fremgangsmåden beskrevet. Der er i alt udført forsøg på følgende 12 forsøgsopstillinger:

7.1 Underbund EPS 60

7.1.1 Forsøg på ren underbund
7.1.2 Forsøg på opbygning med 240 mm SG II (kontrolforsøg 1)
7.1.3 Forsøg på opbygning med 290 mm SG II (kontrolforsøg 2)
7.1.4 Forsøg på opbygning med 340 mm SG II (kontrolforsøg 3)
7.1.5 Forsøg på opbygning med 40 mm SG II, biaksial geonet og 200 mm SG II
7.1.6 Forsøg på opbygning med 40 mm SG II, triaksial geonet og 200 mm SG II

7.2 Underbund EPS 250

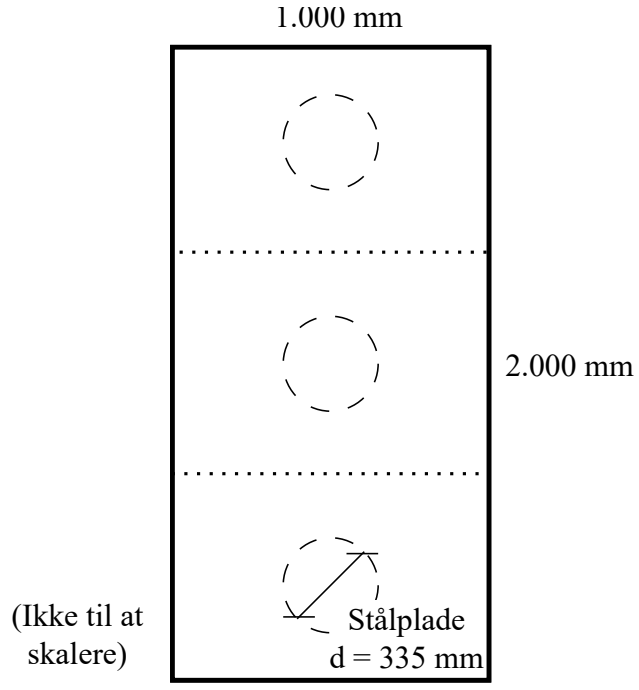
7.2.1 Forsøg på ren underbund
7.2.2 Forsøg på opbygning med 240 mm SG II (kontrolforsøg 1)
7.2.3 Forsøg på opbygning med 290 mm SG II (kontrolforsøg 2)
7.2.4 Forsøg på opbygning med 340 mm SG II (kontrolforsøg 3)
7.2.5 Forsøg på opbygning med 40 mm SG II, biaksial geonet og 200 mm SG II
7.2.6 Forsøg på opbygning med 40 mm SG II, triaksial geonet og 200 mm SG II

På alle opbygningerne er der udført statisk pladebelastningsforsøg. Der er udført cyklisk belastning på opbygningerne med en lagtykkelse på 240 mm stabilt grus, SG II. Efter hvert forsøg er hele forsøgsopbygningen taget op, hvor EPS-pladerne kontrolleret for deformation og hvis nødvendigt udskiftet og forsøgsopbygningen er udlagt på ny. Den faktisk udførte rækkefølge af forsøgene fremgår for de statiske forsøg i appendiks C og for de cykliske i appendiks D, hvor de statisk- og cykliske pladebelastninger er udført i forlængelse af hinanden på samme forsøgsopbygning. Højden på den samlede opbygning er målt efter komprimering. Komprimering er udført med en pladevibrator med ti overkøringer for hver 120 mm stabilt grus, hvor opbygningen løbende er afrettet og kontrolleret med retteskinne og lodstok. I det følgende vil fremgangsmåden blive beskrevet. For alle opbygninger er der udført komprimeringskontrol for at sikre en ens komprimeringsgrad, hvilket er gjort ved af afveje det tilførte stabilt grus og kontrollere højderne af opbygningerne efter komprimering. Komprimeringsgaden er uddybet i appendiks B. På figur 7.1 og 7.2 fremgår siloen, hvor alle forsøgene er udført, både set fra siden og fra oven.

Figur 7.1: Siloen forsøgene er udført i set fra siden.

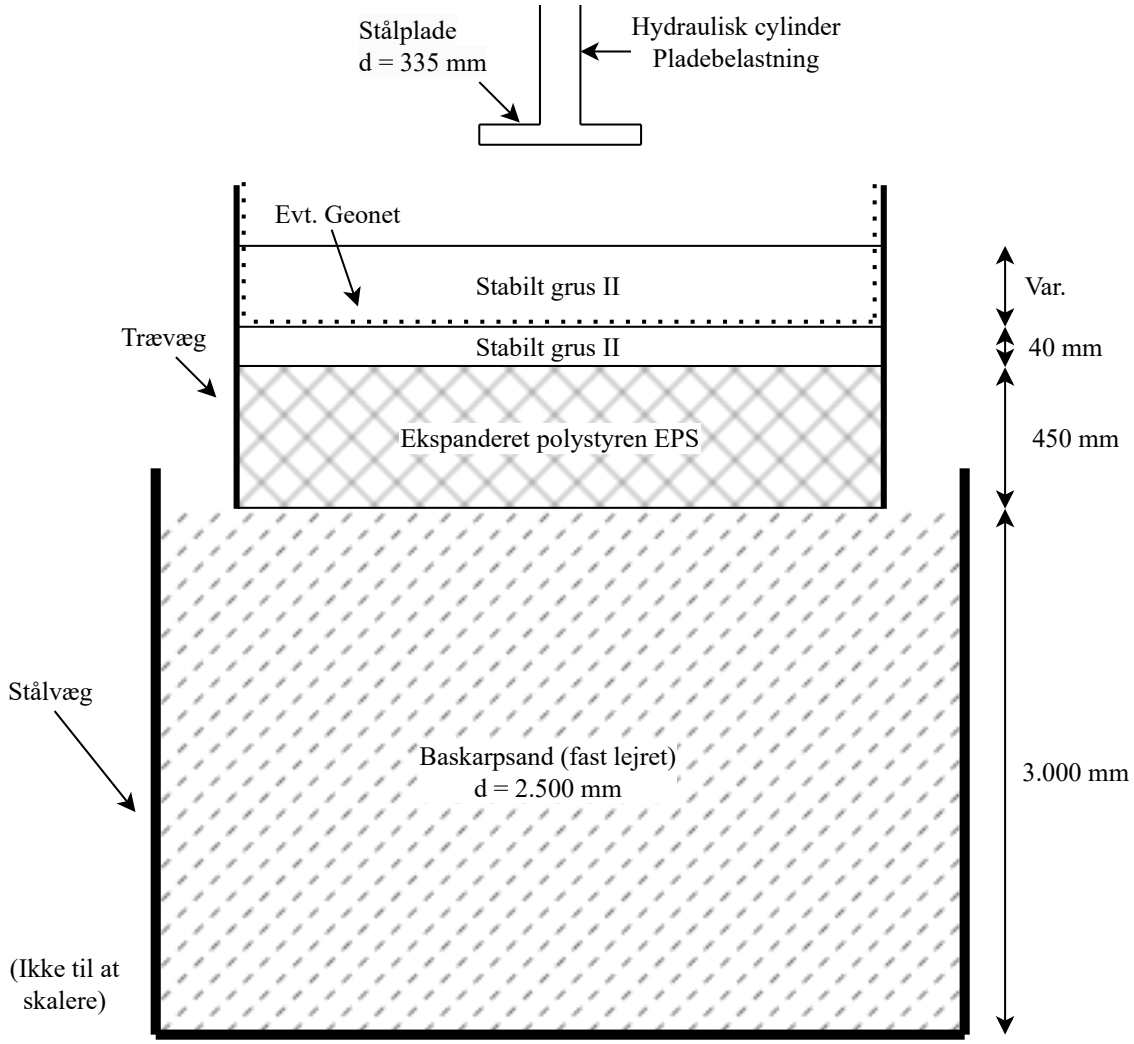
Figur 7.2: Forsøgsopstillingen set fra oven.

Forsøgsopstillingen og de felter der testes i er vist fra oven på figur 7.3.



Figur 7.3: Forsøgsopstilling set fra oven og de tre felter, som der testes i. Statisk pladebelastning i midten og cyklisk pladebelastning i de to ender.

EPS-pladerne har været indkøbt i størrelsen LxBxH=1200x1200x150mm, hvorfor pladerne har været lagt i tre lag og tilskåret i længden og bredden samt lagt i forbandt. Forsøgsopstillingen er vist fra siden på figur 7.4.



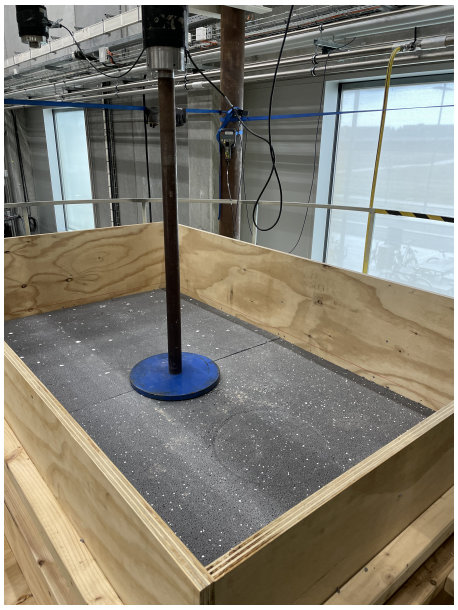
Figur 7.4: Forsøgsopstilling set fra siden.

7.1 Forsøg med underbund EPS 60

Forsøgsopstillingen anvendes til testet på EPS 60 med et opgivet E-modul på 2 MPa (Jackon, 2023).

7.1.1 Forsøg på ren underbund

Forsøgsopstillingen med EPS 60 fremgår af figur 7.5. Styrken af den simulerede underbund bestemmes ved statisk pladebelastning, som vist på figur 7.6. Der udføres ikke cyklisk pladebelastning på denne opbygning.



Figur 7.5: Opbygning med EPS 60 klar til forsøg.

Figur 7.6: Udførelse af statisk pladebelastning.

7.1.2 Kontrolforsøg 240 mm SG II

Kontrolforsøg 1 består af EPS 60 og 240 mm stabilt grus. På denne opbygning er der udført statisk og cyklisk pladebelastning. På figur 7.7 fremgår forsøgskassen viberet og klar til forsøg. På figur 7.8 fremgår udførelsen af nummer to cyklisk test. I midten af feltet er der udført statisk forsøg og længst væk det første cykliske forsøg.

Figur 7.7: Opbygning med EPS 60 og 240 mm stabilt grus efter vibrering.

Figur 7.8: Klargøring til andet forsøg med cyklisk pladebelastning.

7.1.3 Kontrolforsøg 290 mm SG II

Udover forsøg med 240 mm stabilt grus udføres der statisk pladebelastning på en opbygning, hvor laget af stabilt grus øges til 290 mm. Der udføres ikke cyklisk pladebelastning på denne opbygning.

Figur 7.9: Opbygning med EPS 60 og 290 mm stabilt grus klar til forsøg.

Figur 7.10: Blivende deformation efter statisk pladebelastning på opbygningen med EPS 60 og 290 mm stabilt grus.

7.1.4 Kontrolforsøg 340 mm SG II

Der udføres ligeledes kontrolforsøg med 340 mm stabilt grus på underbunden EPS 60. På figur 7.11 fremgår den samlede forsøgsopbygning og på figur 7.12 fremgår den blivende deformation efter statisk pladebelastning.

Figur 7.11: Opbygning med EPS 60 og 340 mm stabilt grus klar til forsøg.

Figur 7.12: Blivende deformation efter statisk pladebelastning.

7.1.5 Forsøg på biaksial geonet B30/30

Forsøg med biaksial geonet, B30/30, medfører indlæggese i forsøgsopbygningen oven på 40 mm stabilt grus, som vist på figur 7.13. Oven på geonettet udlægges 200 mm stabilt grus. Forsøgsopbygningen under opbygning fremgår af figur 7.14.

Figur 7.13: Indlæggelse af biaksial geonet oven på EPS 60 og 40 mm stabilt grus.

Figur 7.14: Opbygning med 200 mm stabilt grus oven på geonettet og udførelse af sidste komprimering.

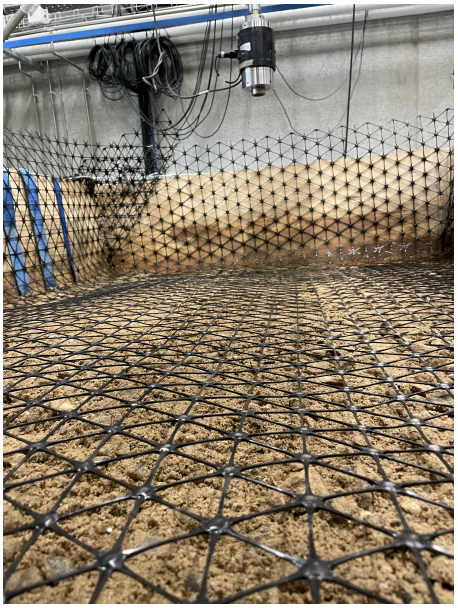
På figur 7.15 fremgår pladen, som er klargjort til statisk pladebelastning, og på figur 7.16 fremgår det under udførelse.

Figur 7.15: Klargørelse til statisk pladebelastning på opbygning med EPS 60 og biaksial geonet.

Figur 7.16: Statisk pladebelastning under udførelse.

7.1.6 Forsøg på triaksial geonet TriAx TX160

Der er ligeledes udført test af det triaksiale geonet, TriAx TX160, på underbunden EPS 60. Det triaksial geonet er vist lagt oven på 40 mm stabilt grus på figur 7.17. Figur 7.18 viser den samlede opbygning med 200 mm stabilt grus oven på geonettet, under udførelse af cyklisk pladebelastning.



Figur 7.17: Triaksial geonet udlagt på 40 mm stabilt på underbud af EPS 60.

Figur 7.18: Den komplette forsøgsopstillig med cyklisk pladebelastning.

7.2 Forsøg på underbund af EPS 250

De næste seks forsøgsopstillinger er udført med en underbund på EPS 250. (Jackon, 2023).

7.2.1 Forsøg på ren underbund

Forsøgsopstillingen med underbund af EPS 250 fremgår af figur 7.19. Der er kun udført statisk pladebelastning for at bestemme E-modulet af opbygningen, hvilket er vist under udførelse på figur 7.20.

Figur 7.19: Underbund med EPS 250 klar til forsøg.

Figur 7.20: Statisk pladebelastning under udførelse.

7.2.2 Kontrolforsøg 240 mm stabilt grus II

Kontrolforsøg 1 består ligesom ved EPS 60, af 240 mm stabilt grus ovenpå den simulerede underbund af EPS 250. På figur 7.21 fremgår statisk pladebelastning under udførelse. På figur 7.22 fremgår cyklisk pladebelastning under udførelse.

Figur 7.21: Statisk pladebelastning på Kontrolforsøg 1 med underbunden af EPS 250.

Figur 7.22: Cyklisk pladebelastning under udførelse.

7.2.3 Kontrolforsøg 290 mm SG II

Kontrolforsøg 2 testes, ligesom opbygningen med EPS 60, med statisk pladebelastning ved en øget lagtykkelse af stabilt grus. På figur 7.23 fremgår opbygningen med 290 mm stabilt grus og statisk

pladebelastning. På figur 7.24 observeres deformationen efter et udført statisk pladebelastning. Der udføres ikke cyklisk pladebelastning på kontrolforsøg 2.

Figur 7.23: Opbygning med EPS 250 og 340 mm stabilt grus klar til statisk pladebelastning.

Figur 7.24: Blivende deformation efter statisk pladebelastning.

7.2.4 Kontrolforsøg 340 mm SG II

Kontrolforsøg 3 består, ligesom for EPS 60, af 340 mm stabilt grus oven på den simulerede underbund af EPS 250. På figur 7.25 observeres den færdige opbygningen klar til forsøg. På figur 7.26 fremgår pladen helt nede ved overfladen af forsøgsopbygningen.

Figur 7.25: Forsøgsopbygning på underbund med EPS 250 og 340 mm stabilt grus.

Figur 7.26: Pladen nedført og klar til udførelse af statisk pladebelastning.

7.2.5 Forsøg på biaksial geonet B30/30

Dette forsøg er udført med et biaksial geonet, B30/30, på underbund af EPS 250. På forsøgsopbygningerne er der både udført statisk og cyklisk pladebelastning. På figur 7.27 fremgår det statiske pladebelastning under udførelse og på figur 7.28 er der klargjort til cykliske pladebelastning.

Figur 7.27: Udførelse af statisk pladebelastning på opbygningen med biaksial geonet og EPS 250.

Figur 7.28: Klargørelse til cyklisk pladebelastning.

7.2.6 Forsøg på triaksial geonet TriAx TX160

Opbygningen med triaksial geonet på underbunden af EPS 250, er udført med samme fremgangsmåde som underbund på EPS 60. På figur 7.29 observeres de første to belastningsfelter, hvor det cykliske pladebelastningsforsøg er færdigudført. På figur 7.30 fremgår det statiske pladebelastningsforsøg under udførelse.

Figur 7.29: Klargørelse til statisk pladebelastningsforsøg.

Figur 7.30: Statisk pladebelastningsforsøg under udførelse.

7.3 Fejlkilder

Forsøgene udføres i laboratoriet for at kontrollere forholdene mest muligt. Det ubundne bærelag, stabilt grus, er ikke kontrolleret i forhold til de opgivne specifikationer, ud over den beskrevet komprimeringskontrol i appendiks B. Materialet er leveret med en sigte- og vibrationsanalyse. Resultaterne er ikke kontrolleret, hvilket betyder, at der ikke udført sigteanalyse, proctorforsøg, relativ lejringstæthed eller vibrationsforsøg på det leveret stabilt grus. Dette kan ende med at være en mulig fejlkilde i forsøgsresultaterne, fordi kvaliteten af stabilt grus er afgørende for at opnå et resultat, som også kan opnås ved en udlægning af et ubundet bærelag i felten.

Vandindholdet af stabilt grus er ikke kontrolleret eller sikret undervejs. Dette er ligeledes en fejlkilde, eftersom gruset til en hvis grad må forventes at udtørre med tiden, når forsøgene udføres i indendørs tørre omgivelser. Derfor er forsøgsrækkefølgen ikke ubetydelig, selvom det er afdækket med plastik undervejs.

Komprimering er udført ved, at der er vibreret med en pladevibrator ti gange i hver sin retning af kassen for hver 12 mm stabilt grus. Metoden har bidraget til, at opnå den mest ensartet komprimering. Samtidig har lagtykkelserne af de samlede opbygninger været kontrolleret med det planlagte. Der kan argumenteres for, at komprimeringen af pladevibratoren ikke har været tilstrækkelig til at efterligne den komprimering, som der kan opnås med større og tungere maskiner til en virkelig vejopbygning.

8 Forsøgsresultater

I dette kapitel præsenteres forsøgsresultaterne. Alle resultaterne er fra forsøgsbeskrivelsen, som er præsenteret i kapitel 7. Metoden til fremstilling af resultaterne fremgår i afsnit 2.5. Reference oversigt over antallet af forsøg, figurer og grafer med E-modul fremgår i appendiks C. Der er udført i alt 22 statiske pladebelastningsforsøg, hvoraf 13 resultater er anvendt. Der er udført i alt 17 cykliske pladebelastningsforsøg, hvoraf resultaterne fra 12 af forsøgene er endeligt anvendt.

Når der bygges på en blød bund, så har det indvirkning på materialet, som ligger over, hvilket i dette tilfælde er stabilt grus, hvilket har et E-modul 300 MPa. Derfor vil der ikke opnås et E-modul på 300 MPa eftersom dette kun opnås på en opbygning med stabilt grus alene. Derfor vil der i det følgende ikke opnås et tilsvarende højt E-modul.

8.1 Statisk pladebelastning

Resultaterne fra de statiske pladebelastningsforsøg er anvendt til at beregne E-modul for opbygningen. E-modulet er for hele opbygningen, hvilket betyder, at det er for EPS, geonet og stabilt grus. Resultaterne for opbygningerne med en underbund af EPS 60, fremgår af tabel 8.1.

Tabel 8.1: Forsøgsresultater fra statisk pladebelastning med opnået E-moduler på underbunden EPS 60. Grafer fremgår af appendiks C.

EPS 60	**Kontrolforsøg 1** SG 240 mm	**Kontrolforsøg 2** SG 290 mm	**Kontrolforsøg 3** SG 340 mm	**Biaksial** SG 240 mm	**Triaksial** SG 240 mm
1,4 MPa	13 MPa	14 MPa	18 MPa	18 MPa	20 MPa
Forbedring	-	13%	42%	38%	58%

Resultaterne viser ved statisk pladebelastning, at underbunden har et E-modul på 1,4 MPa. Ved udlæggelse 240 mm stabilt grus oven på underbunden, opnås et E-modul på 13 MPa. Ved at indlægge geonet oven på de første 40 mm stabilt grus, opnås der med et biaksial geonet et E-modul på 18, hvilket er en forbedring på 38 % i forhold til den uarmerede tilstand. Ligeledes ved indlæggelse af triaksial geonet opnås et E-modul på 20 MPa, hvilket er en forbedring på 58% i forhold til den uarmerede tilstand. Ved udlæggelse af 340 mm stabilt grus oven på planum opnås samme E-modul, som opbygningen med biaksial geonet på 18 MPa. Dette svarer til, at der ved 240 mm stabilt grus og et biaksial geonet, opnås samme E-modul uden geonet, men med en lagtykkelse på 340 mm stabilt grus. Resultaterne fra de statiske pladebelastningsforsøg på underbunden med EPS 250 fremgår af tabel 8.2.

Tabel 8.2: Forsøgsresultater fra statisk pladebelastning med opnået E-moduler på underbunden EPS 250. Grafer fremgår af appendiks C.

EPS 250	**Kontrolforsøg 1** SG 240 mm	**Kontrolforsøg 2** SG 290 mm	**Kontrolforsøg 3** SG 340 mm	**Biaksial** SG 240 mm	**Triaksial** SG 240 mm
7,5 MPa	21 MPa	19 MPa	28 MPa	27 MPa	30 MPa
Forbedring	-	-10%	30%	28%	39%

Resultaterne fra statisk pladebelastning på underbunden viser et E-modul på 7,5 MPa. Ved udlæggelse af 240 mm stabilt grus oven på underbunden opnås et E-modul på 21 MPa. Ved

indlæggelse af et biaksial geonet under 200 mm stabilt grus, opnås et E-modul på 27 MPa og ved indlæggelse af det triaksiale geonet opnås et E-modul på 30 MPa. Dette giver en forbedring fra den uarmerede tilstand på henholdsvis 28 og 39% ved indlæggelse af geonet. Ved indlæggelse af et biaksial geonet, opnås et lidt lavere E-modul sammenlignet med kontrolforsøg 3 med 340 mm stabilt grus. Det kan også observeres, at der ved indlæggelse af det triaksiale geonet opnå en større styrkeforøgelse end det biaksiale geonet.

Der er i forsøg på besparelse af materialer, udført kontrolforsøg 2 og 3 på både opbygning med 1,4 og 7,5 MPa. Ved kontrolforsøg 2 er der tilføjet 50 mm ekstra stabilt grus og ved kontrolforsøg 3 er der tilføjet 100 mm ekstra stabilt grus. Dette burde give en styrkeforøgelse, men resultater ved kontrolforsøg 2 tyder på fejl, da der i tabel 8.1 og 8.2 kan observeres en forbedring på 1 MPa underbunden 1,4 MPa og henholdsvis 2 MPa dårligere ved underbunden 7,5 MPa. Kontrolforsøg 3 viser et bedre resultat, hvor E-modulet blev forbedret med henholdsvis 30 og 42 %.

Resultaterne viser en tydelig forbedring ved indlæggelse af geonet i stabilt grus på blød bund ved en lagtykkelse på 240 mm, og at der opnås et højere E-modul ved brug af triaksial geonet frem for biaksial geonet. Det skal tages i betragtning, at de få forsøgsresultaterne giver et forsigtighedsprincip omkring forbedringen, så forbedringen i realiteten både kan være mindre eller større ved flere målinger.

8.1.1 Yderligere reducering af stabilt grus

Specialet har belyst en forsøgsopbygning, som ikke er beskrevet i forsøgsbeskrivelsen og resultaterne. Opbygningen består af 100 mm stabilt grus oven på det triaksiale geonet. Der er udført et forsøg med triaksial geonet og 100 mm stabilt grus på underbunden 1,4 MPa, som ifølge tabel 8.1 burde være muligt, grundet en stivhedsforøgelse på 58% ved indlæggelse af triaksial geonet i 240 mm. Forsøget viser et E-modul på 6 MPa, hvilket bekræfter Byggros anbefaling om en minimumstykkelse på 200 mm oven på geonettet for at opnå en effekt.

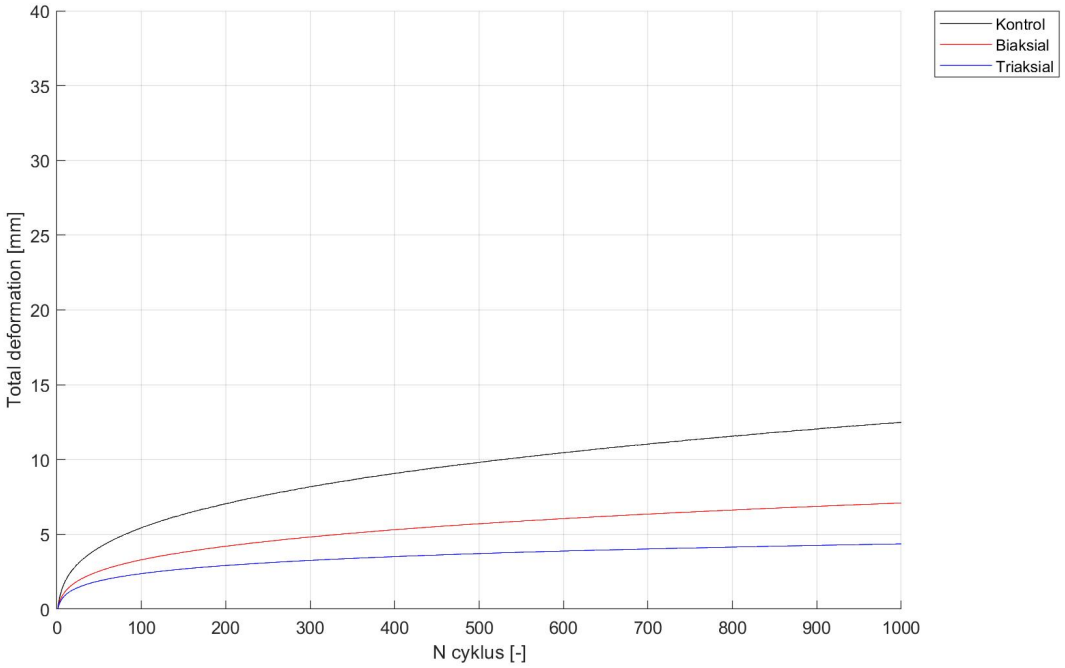
8.2 Cykliske pladebelastning

De cykliske pladebelastnings forsøg er udført på opbygninger med i alt 240 mm stabilt grus. Der er udført cykliske forsøg med 1.000 cyklus på opbygninger med underbunde med styrken 1,4 og 7,5 MPa. Hver enkelt belastning og aflastning fremgår af appendiks D. Der er på underbunden 1,4 MPa anvendt en gentagen belastning på 12 kN og på underbunden 7,5 MPa en gentagen belastning på 30 kN. Den cykliske belastning er anvendt ud fra statisk pladebelastning, hvor det blev besluttet, at anvende halvdelen af den maksimalt opnåede belastning. Denne belastning er valgt, fordi der indledningsvist til forsøgene blev forsøgt at belaste opbygningen svarende til et 10-tons akseltryk. Belastningspladen som er anvendt, har en størrelse svarende til et dæktryk på 0,7 MPa, hvilket svarer til 60 kN. Belastningen har vist sig at være en for stor belastning til opbygningen med underbunden 1,4 MPa, og vil formentlig også være det ved underbunden 7,5 MPa, grundet 60 kN ikke blev opnået ved statisk pladebelastning ved den uarmerede opbygning. Det påførte tryk på de to opbygninger er vist i tabel 8.3.

Tabel 8.3: Påført kraft og tryk på de anvendte underbunde ved cyklisk pladebelastning med en cirkulær plade d=335 mm.

Underbund	Kraftpåvirkning	Kontakttryk
1,4 MPa	12 kN	0,14 MPa
7,5 MPa	30 kN	0,34 MPa

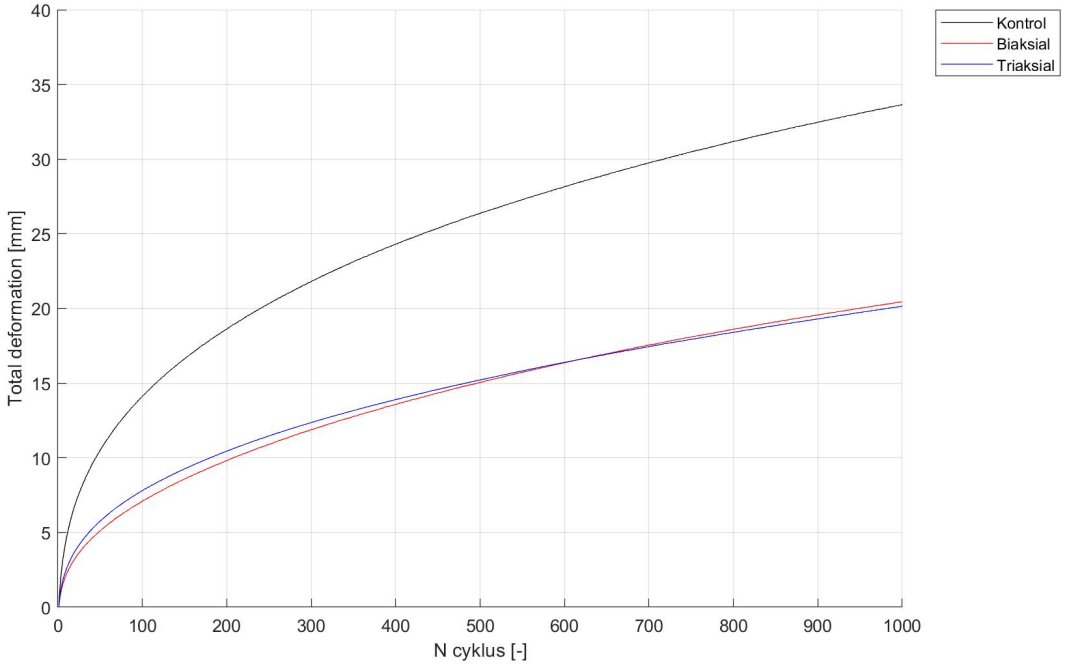
På figur 8.1 fremgår deformationen som funktion af antal cyklus for underbunden 1,4 MPa. Der er i de afbilledegrafer korrigeret for, at deformationen skal starte ved 0 mm, hvorfor der er fundet den gennemsnitlige deformation for de to forsøg for hver opbygning. Deformationen der er afbildet, er for den blivende deformation. Resultaterne for hvert testfelt fremgår af appendiks D.



Figur 8.1: Forsøg på underbunden 1,4 MPa - Cyklisk belastning med 1.000 cyklus med en kraft på 12 kN og den dertilhørende blivende derformation.

Opbygning med en underbunden 1,4 MPa viser en tydelig forskel mellem kontrolopbygning, opbygningen med det biaksial geonet og opbygningen med triaksial geonet. Deformationen er reduceret fra 13 mm i kontrolforsøget til 4-7 mm i opbygning med henholdsvis biaksial og triaksial geonet efter belastning af 1.000 cyklus med 12 kN.

På figur 8.2 fremgår den blivende deformationen som funktion af antal cyklus for underbunden 7,5 MPa.



Figur 8.2: Forsøg på underbunden 7,5 MPa - Cyklisk test med 1.000 cyklus og en kraft på 30 kN med den dertilhørende blivende derformation.

Forsøgsopbygningen med en underbund af 7,5 MPa er forskellen i deformation fra 34 mm i kontrolforsøget til omkring 20 mm for begge forsøgsopbygninger med geonet. Alle deformationer er afhængige af antal cyklus, som fremgår i appendiks D

8.3 Armeringseffekt

Der er i dette afsnit regnet en armeringseffekt, TBR-værdi, som det fremgår af litteraturstudiet. Forholdet regnes ved følgende udtryk $TBR_{def} = \frac{N_{armeret}}{N_{uarmeret}}$. Hvor N er antal cyklus ved en fastsat deformation. I tabel 8.4 fremgår forholdet for underbunden 1,4 MPa og tabel 8.5 fremgår forholdet for underbunden 7,5 MPa.

Tabel 8.4: Armeringseffekt for de cykliske belastninger - Underbund 1,4 MPa belastet med 12 kN.

Deformation	**Uarmeret**	**Biaksial**	**Triaksial**
[mm]	-	Geonet	Geonet
2,0	1	2,4	5,0
4,3	1	3,8	17,8
7,1	1	4,9	-
Gennemsnit	**1**	**3,7**	**13,9**

Resultaterne viser, at armeringseffekten for det triaksiale geonet er større end den uarmerede tilstand. Det skal tages i betragtning, at belastningen kun er 12 kN. Det fremgår også af figur 8.1, at opbygning med det triaksiale geonet kun opnår en deformation på 4 mm og det biaksiale geonet en deformation på 7 mm efter 1.000 cyklus. Dette er til trods for at den uarmerede tilstand opnår en deformation på 12,5 mm. Der kan sættes spørgsmål ved om belastningen har været tilstrækkelig stor.

Tabel 8.5: Armeringseffekt for de cykliske belastninger - Underbund 7,5 MPa belastet med 30 kN.

Deformation [mm]	**Uarmeret** -	**Biaksial** Geonet	**Triaksial** Geonet
10	1	2,6	4,0
12	1	4,5	4,1
15	1	4,2	4,1
20	1	4,0	4,1
Gennemsnit	**1**	**3,8**	**4,1**

På underbunden med 7,5 MPa fremgår det ud fra tabel 8.5, at forholdet i mellem den uarmeret tilstand for det triaksiale og biaksiale geonet næsten er ens. Det triaksiale geonet har en lidt større armeringseffekt end det biaksiale geonet. Ud fra figur 8.2, fremgår det også, at det biaksiale og triaksiale geonet ligger tæt på hinanden, hvorfor armeringseffekten også vil være tilsvarende ens. Forskellen vil formentlig blive større hvis der udføres flere end de 1.000 cyklus, men antallet giver en indikation af, hvordan opbygningen reagerer på gentagende belastninger. Der kan derved stilles spørgsmålstegn ved, om størrelsen på de gentagende belastninger på 30 kN er tilstrækkelig til at vise forskellen i opbygningerne.

9 Databehandling

I dette kapitel vil resultaterne fra de statiske pladebelastningsforsøg blive behandlet. Det undersøges om der er en sammenhæng, som kan anvendes til at forudsige ændringen af E-modulet ved indlæggelse af geonet i stabilt grus på henholdsvis en underbund på EPS 60 med 1,4 MPa og EPS 250 med 7,5 MPa. Underbunden betragtes i dette afsnit som 450 mm ekspanderet polystyren, EPS, og 40 mm stabilt grus, SG. Forsøgsresultaterne fra statisk pladebelastning og den procentvise forbedring ved indlæggelse af geonet fremgår af tabel 9.1.

Tabel 9.1: Forsøgsresultater fra statisk pladebelastningsforsøg samt procentvis forbedring afhængigt af lagtykkelsen på stabilt grus, SG.

Lagtykkelse	Kontrol	Biaksial	Forbedring	Triaksial	Forbedring
		EPS 60 + 40 mm SG			
SG 200 mm	13 MPa	18 MPa	38%	20 MPa	58%
SG 250 mm	14 MPa	-	-	-	-
SG 300 mm	18 MPa	-	-	-	-
		EPS 250 + 40 mm SG			
SG 200 mm	21 MPa	27 MPa	28%	30 MPa	39%
SG 250 mm	19 MPa	-	-	-	-
SG 300 mm	28 MPa	-	-	-	-

Forsøgsresultaterne viser en forbedring ved indlæggelse af geonet. Kontrolforsøgene er udført med følgende lagtykkelser 200, 250 og 300 mm, hvor en forøgelse af lagtykkelsen burde resultere i en øget stivhed, som giver et højere E-modul. Ved en underbunden med EPS 60 opnås en stigning på 1 MPa ved at ændre lagtykkelsen til 250 mm stabilt grus. Ligeledes observeres en stigning på 5 MPa ved en lagtykkelse på 300 mm stabilt grus. Ved en underbund af EPS 250, observeres en reducering på 2 MPa af E-modulet ved en lagtykkelse på 250 mm stabilt grus. Ved 300 mm stabilt grus oven på geonettet øges E-modulet i stedet for med 5 MPa. I forbindelse med databehandling er det væsentligt at forholde sig til rækkefølgen forsøgene er udført i, denne rækkefølge fremgår af appendiks C.

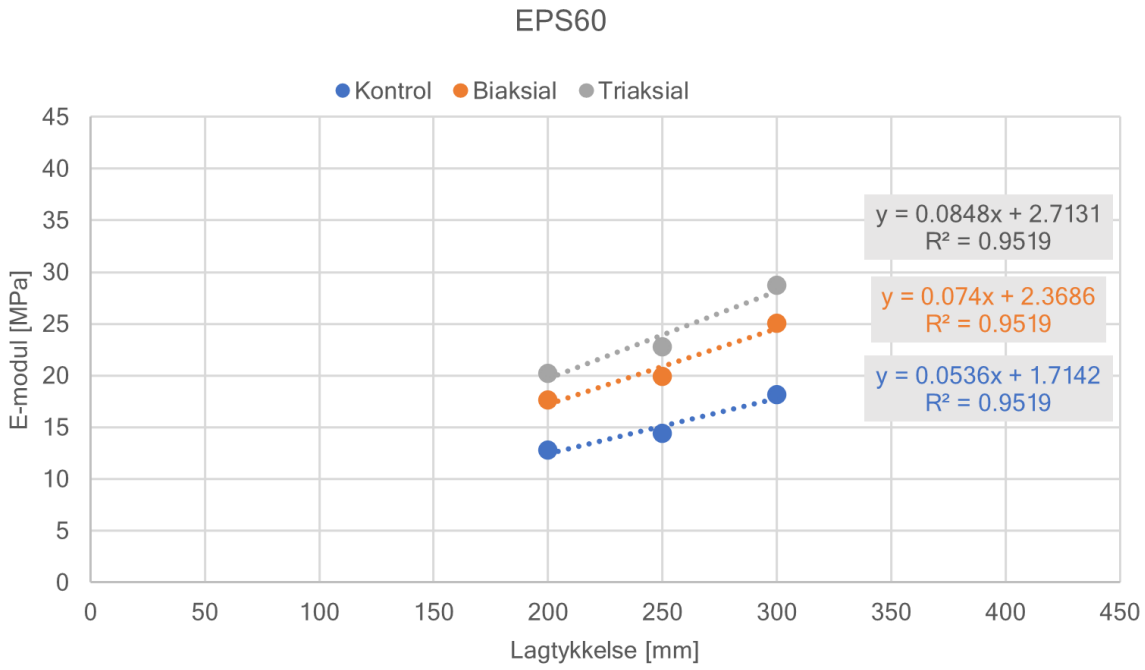
Forsøget med en lagtykkelse på 250 mm med underbundene EPS 60 og EPS 250 viser en lav styrkeforøgelse eller en reducering i styrken, hvilket kan være påvirket af rækkefølgen, som forsøgene er udført i. Der er udført flere forsøg end de anvendte, eftersom der er forkastet resultater undervejs. Forsøgene med 250 og 300 mm stabilt grus er udført 3 uger efter de andre forsøg, hvilket kan have påvirket resultaterne. Dette kan blandt andet være, fordi udtørring af stabilt grus kan reducere komprimeringsgraden og derved styrken. Dette kan være en mulig forklaring til resultatets forholdsvis lille stigning eller fald i E-modul.

Ved antagelse om, at den procentvise ændring er den samme med og uden geonet, når lagtykkelsen øges, kan denne procentvise stigning bruges til at beregne E-modulerne for forsøg, der ikke er udført i praksis. Dette fremgår markeret med grå i tabel 9.2.

Tabel 9.2: Beregnede E-moduler ud fra procentvis forbedring. De grå felter viser, de beregnede værdier og de resterende er resultater, er fra laboratorieforsøg.

Lagtykkelse	Kontrol	Biaksial	Triaksial
EPS 60 + 40 mm SG		38%	58%
SG 200 mm	13 MPa	18 MPa	20 MPa
SG 250 mm	14 MPa	20 MPa	23 MPa
SG 300 mm	18 MPa	25 MPa	29 MPa
EPS 250 + 40 mm SG		28%	39%
SG 200 mm	21 MPa	27 MPa	30 MPa
SG 250 mm	19 MPa	25 MPa	27 MPa
SG 300 mm	28 MPa	36 MPa	39 MPa

Tabellen viser styrkeforøgelse ved indlæggelse af geonet og effekten ved en øget lagtykkelse. De beregnede E-moduler afbildes for at undersøge, om datapunkterne danner grundlag for en lineær sammenhæng. Datapunkter er plottet for henholdsvis underbund med EPS 60 på figur 9.1 og underbund med EPS 250 på figur 9.3.

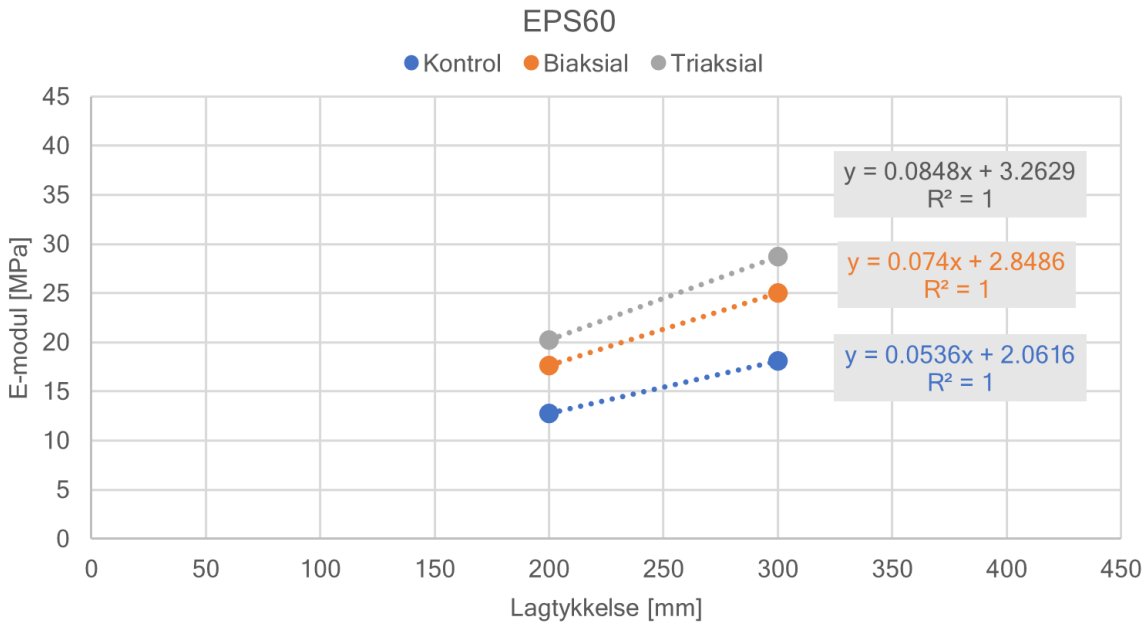


Figur 9.1: Lineære sammenhæng for beregnede forbedringer ved indlæggelse af geonet, med udgangspunkt i tabel 9.2. E-modul af hele opbygningen, som funktion af lagtykkelsen på stabilt grus oven på geonet.

Figuren viser, at der kan formodes at være en lineær sammenhæng mellem datapunkterne. R^2-værdien beskriver usikkerheden af den lineære model. I dette tilfælde, er alle punkterne 95% fra at ligge på den ret linje. Herved kan modellen forklare usikkerheden af E-modulet i relation til lagtykkelsen, med en lav usikkerhed. Skæringspunktet på y-aksen, for de forskellige datasæt, viser forskellige værdier fra 1,7 til 2,7 MPa. Skæringen på y-aksen, beskriver i dette tilfælde E-modulet for underbunden, bestående af 450 mm EPS 60 og 40 mm stabilt grus, hvilket muliggør, at stabilt

grus kan forkile sig under geonettet. Skæringen på y-aksen, bør være ens, eftersom underbunden og lagtykkelsen af stabilt grus er konstant ved hvert forsøg. Den varierende skæring, tyder på, at der ar været en usikkerhed i målingerne, hvor en mulig forklaring er, at der har været deformation af det underliggende sand. Eller der er variation af EPS-pladernes E-modul. Hældningen af grafen viser forøgelsen af E-modulet pr. mm stabilt grus. Hældningen er derfor større, når kontrolforsøgene sammenlignes med det biaksiale og triaksiale geonet.

Ved observering af E-modulet fra forsøgsresultaterne, på EPS 60, hvor lagtykkelsen af stabilt grus er 250 mm oven på geonet, er E-modulet forøget med 1 MPa. Dette er ved tilføjelse af 50 mm ekstra stabilt grus, hvilket er en relativ lille stigning, når det tages i betragtning, at der er tilføjet ekstra stabilt grus, som giver øget stivhed. Derfor tages dette datapunkt ud, for at undersøge forskellen i den lineære sammenhæng med to punkter og tre punkter. Grafen fremgår af figur 9.2.



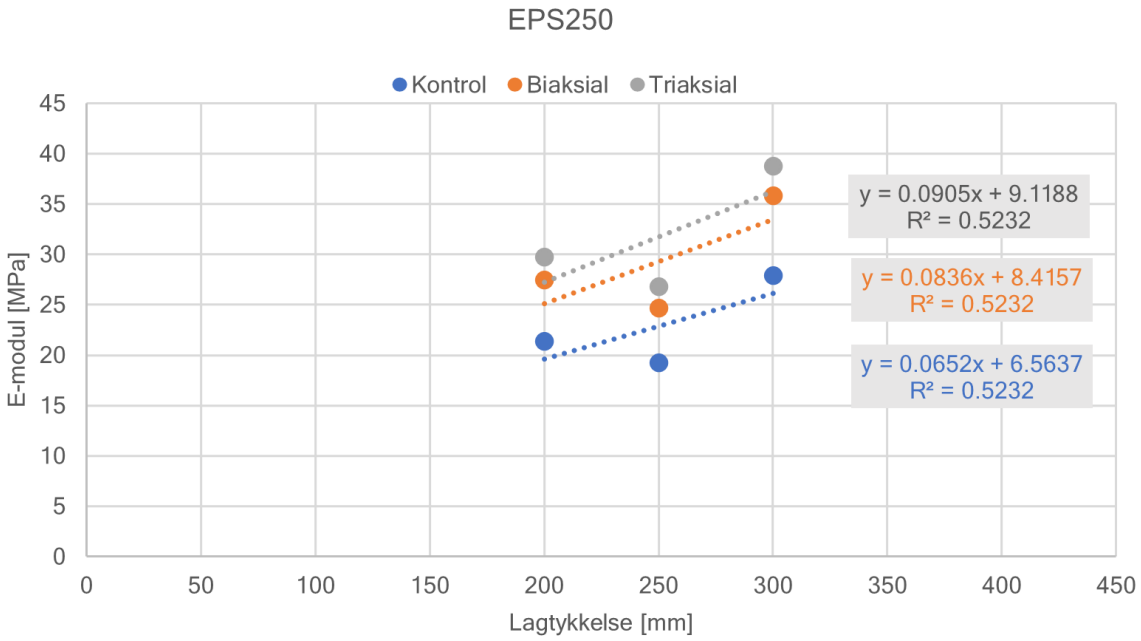
Figur 9.2: Lineære sammenhænge ved beregnede forbedringer under indlæggelse af geonet, data fra tabel 9.2. E-modulet af hele opbygningen, som funktion af lagtykkelse på stabilt grus over geonet.

Figuren viser en R^2-værdi på 1, fordi der kun er afbildet to datapunkter og den lineære tendenslinje går igennem begge punkter. Det observeres, at skæringen med y-aksen er forskellig for de tre lineære tendenslinjer med tre datapunkter. Hældningen af graferne er ens med henholdsvis to og tre datapunkter. Den lineære forskrift for henholdsvis tre og to datapunkter sammenlignes, i forskellen på resultatet af E-modulet, differencen fremgår af tabel 9.3.

Tabel 9.3: Difference mellem de lineære sammenhænge for henholdsvis to og tre datapunkter, jf. figur 9.1 og 9.2.

Forsøg	Difference
EPS 60 + 40 mm SG	
Kontrol	0,35 MPa
Biaksial	0,48 MPa
Triaksial	0,55 MPa

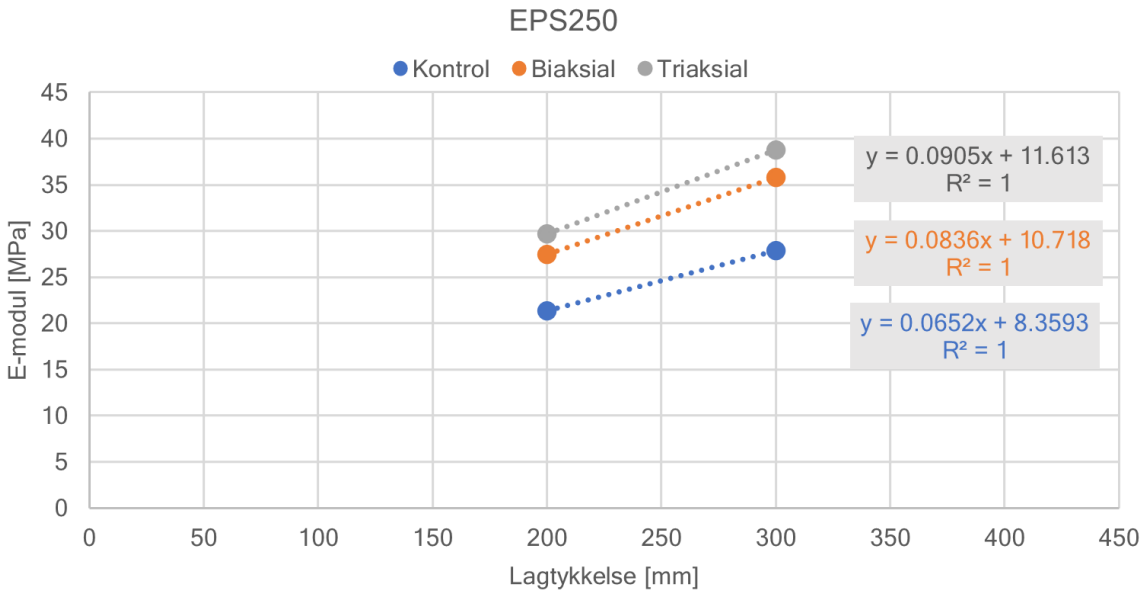
Jf. tabel 9.3 fremgår det, at forskellen på den lineære sammenhæng med henholdsvis to og tre datapunkter er relativ lille. Forskellen er E-modulet ved en lagtykkelse på 0 mm stabilt grus over geonettet, er maksimalt 0,55 MPa. Den lille forskel bunder i forskellen af skæring med y-aksen. Den lille forskel giver incitament til at udføre samme fremgangsmåde for opbygningen på EPS 250. De tre datapunkter for henholdsvis kontrolforsøg, biaksial og triaksial på en underbund af EPS 250 fremgår af figur 9.3.



Figur 9.3: Lineære sammenhænge ved beregnede forbedringer under indlæggelse af geonet, data fra tabel 9.2. E-modulet for hele opbygningen, som funktion af lagtykkelsen af stabilt grus over geonettet.

Figuren viser, at datapunkterne ligger langt fra de lineære tendenslinjer, hvilket giver en stor usikkerhed på, om datapunkterne danner en lineær sammenhæng. R^2-værdien viser, at der er 52% sandsynlighed for, at datapunkterne ligger på en ret linje. E-modulet reduceres med 2 MPa, selvom der er tilført 50 mm ekstra stabilt grus, som burde øge stivheden af opbygningen. Af den grund antages det punkt, for at være en fejlmåling og tages derfor ud af sammenhængen. Der plottes udelukkende data for forsøget med 200 og 300 mm stabilt grus oven på geonettet. I resultatbehandlingen af forsøget med en underbund af EPS 60, fremgår det af tabel 9.3, at der er en lille forskel i skæring med y-aksen ud fra de to tendenslinjer. Derfor er resultaterne plottet med

to datapunkter og de lineære sammenhænge fremgår af figur 9.4.



Figur 9.4: Lineære sammenhænge ved den beregnede forbedring under indlæggelse af geonet, data fra tabel 9.2. E-modulet for hele opbygningen, som funktion af lagtykkelsen af stabilt grus over geonet.

Figur 9.4, viser forbedrede bedre lineære sammenhænge efter den forkastet måling af lagtykkelsen på stabilt grus på 250 mm. Denne lineære sammenhæng, kan derfor anvendes til at finde E-modulet for hele opbygningen ved en given lagtykkelse. Det observeres ligeledes, at skæreringen med y-aksen igen er forskellig, selvom underbunden er den samme. Her kan en mulig forklaring, ligesom ved underbunden af EPS 60, være, at der har været deformation på det underliggende sand. Eller at EPS-pladernes E-modul kan variere. Hældningen af graferne viser, at eksempelvis det triaksiale geonet øger stivheden af materialet, med 0,0905 MPa pr. mm stabilt grus over geonettet. Differencen af E-modulet er større ved underbunden bestående af EPS 250. Dette er på grund af den forkastet måling, som gør differencen større, da det i dette tilfælde har betydning for skæring med y-aksen. Differencen fremgår af tabel 9.4.

Tabel 9.4: Difference mellem de lineære sammenhænge mellem henholdsvis to og tre datapunkter, jf. figur 9.3 og 9.4.

Forsøg	Difference
EPS 250 + 40 mm SG	
Kontrol	1,8 MPa
Biaksial	2,3 MPa
Triaksial	2,5 MPa

9.1 Lineære tendenslinjer for styrkeforøgelsen

Dette kapitel har redegjort for en lineær sammenhæng i forøgelsen af styrken ved indlæggelse af geonet i stabilt grus. De beregnede sammenhænge fremgår af tabel 9.5.

Tabel 9.5: Lineære sammenhæng mellem lagtykkelse af stabilt grus, x, og et muligt opnået E-modul, y. De lineære tendenslinjer er fundet for tre datapunkter ved EPS 60 og to datapunkter for EPS 250, som fremgår af figur 9.2 og 9.4.

Type	Forskrift	Usikkerhed
Underbund med EPS 60 + 40 mm SG		
Opbygning uden geonet	y = 0,0536x + 1,7142	R^2=0,95
Biaksial opbygning	y = 0,0740x + 2,3686	R^2=0,95
Triaksial opbygning	y = 0,0848x + 2,7131	R^2=0,95
Underbund med EPS 250 + 40 mm SG		
Opbygning uden geonet	y = 0,0652x + 8,3593	R^2=1,00
Biaksial opbygning	y = 0,0836x + 10,718	R^2=1,00
Triaksial opbygning	y = 0,0905x + 11,613	R^2=1,00

Betingelserne for denne sammenhængen er, en minimumslagtykkelse på 200 mm stabilt grus over geonettet. Denne minimumstykkelse er fundet ud forsøgsresultater og fra interview med leverandøren af geonettet, som fremgår af afsnit 4.1. Ligeledes kan sammenhængen kun anvendes til underbunde på 1,4 MPa og 7,5 MPa. Derudover er der i afsnit 8.1.1 belyst en opbygning under 200 mm, hvilket gav en væsentlig lavere styrke end forventet, hvorfor denne lagtykkelse bør overholdes.

Yderligere skal det være i mente, at den lineær sammenhæng afbrydes ved en given lagtykkelse af stabilt grus. Dette sker grundet geonettets styrkeforøgelse må formodes, at opnå sin maksimale styrke i stabilt grus ved en given lagtykkelse.

Et eksempel på anvendelsen af de lineære tendenslinjer er, at der ved en underbund på 7,5 MPa udlægges 300 mm stabilt grus opnås et E-modul på 28 MPa. Hvis der tilføjes et triaksial geonet af typen TriAx TX160, og i stedet udlægges 200 mm stabilt grus opnås et E-modul på 30 MPa. Dette giver en mulig reducering af lagtykkelsen på 100 mm ved at indlægge et triaksial geonet. Det skal tages i betragtning, at de 40 mm stabilt grus antages at have samme forkillingseffekt, som det underliggende bundsikringssand i en virkelig vejopbygning.

10 Dimensionering af vejbefæstelse i MMOPP

Der vil i dette kapitel dimensioneres en lagtykkelse for det ubundne bærelag, stabilt grus, til en underbund på henholdsvis 1,4 og 7,5 MPa. Beregningerne udføres med udgangspunkt i programmet MMOPP, Matematical Modeling Of Pavement Performance, der er et dimensioneringsprogram til dimensionering af vejbefæstelser. MMOPP regner ud fra trafikbelastning, underbund og valg af materialer; en levetid og lagtykkelsen for vejens opbygning. Beregningen er udført analytisk, hvor metoden og begrundelsen for dette valg fremgår af appendiks E.

10.1 MMOPP dimensionering af det ubundet bærelag

Beregningerne udføres med udgangspunkt i trafikklasse T5, for både en frosttvivlsom og frostfarlig underbund til en dimensioneringsperiode på 20 år. Underbunden på henholdsvis 1,4 og 7,5 MPa, kan både klassificeres som frostfarlig og frosttvivlsom, afhængigt af underbundens materiale. Hvis underbunden eksempelvis indeholder meget silt eller organisk materiale, vil den ofte blive klassificeret som frostfarlig, og hvis underbunden eksempelvis består af ler, bliver underbundet ofte klassificeret som frosttvivlsom. Klassifikationen af underbunden har betydning for koblingshøjden. I appendiks E fremgår vejledningen til klassifikation af koblingshøjden afhængigt af underbunden. I dette kapitel præsenteres kun MMOPPs resultater for det ubundet bærelag, stabilt grus, jf. tabel 10.1.

Tabel 10.1: Dimensioneret minimumslagtykkelse for stabilt grus til trafikklasse T5 på underbunde 1,4 og 7,5 MPa ved antagelse om, at underbunden er frosttvivlsom eller frostfarlig.

	Underbund	**Stabilt grus**
Frosttvivlsom/frostfarlig	1,4 MPa	280 mm
	7,5 MPa	260 mm

Resultaterne fra MMOPP-beregningen viser, at der afhængigt af underbunden styrke skal tilføjes i mellem 260-280 mm stabilt grus. Om underbunden klassificeres som frostfarlig eller frosttvivlsom har ikke betydning for lagtykkelsen af det ubundne bærelag, stabilt grus, hvorimod det har betydning for lagtykkelsen af bundsikring, som skal holde vejkassen drænet og fri for frostskader. Resultatet af lagtykkelsen for alle lagene i vejopbygningen fremgår af appendiks E.

MMOPP-resultaterne, kan sammenkobles med specialets forsøgsresultater fra kapitel 8, hvor det fremgår, at E-modulet af hele opbygningen kan opnå højere styrke ved implementering af geonet i stabilt grus. Der er ud fra de lineære tendenslinjer, beregnede de nødvendige lagtykkelser for at opnå samme styrke i den uarmerede som den armede opbygning. Resultaterne fremgår af tabel 10.2.

Tabel 10.2: Lineær sammenhæng mellem lagtykkelse af stabilt grus, x, og et muligt opnået E-modul, y. Beregningerne tager udgangspunkt i E-modulet for opbygningerne uden geonet. De lineære tendenslinjer er fundet i kapitel 9.

Type	Forskrift	Lagtykkelse	Anvendt lagtykkelse
Underbund på 1,4 MPa			
Opbygning uden geonet	y = 0,0536x + 1,7142	280 mm	280 mm
Biaksial opbygning	y = 0,0740x + 2,3686	194 mm	200 mm
Triaksial opbygning	y = 0,0848x + 2,7131	165 mm	200 mm
Underbund på 7,5 MPa			
Opbygning uden geonet	y = 0,0652x + 8,3593	260 mm	260 mm
Biaksial opbygning	y = 0,0836x + 10,718	175 mm	200 mm
Triaksial opbygning	y = 0,0905x + 11,613	151 mm	200 mm

Her skal det bemærkes, at det beregnede ækvivalente lagtykkelser ikke kan anvendes direkte, grundet den beviste minimums lagtykkelsen oven på geonettet på 200 mm, for at opnå en styrkeforøgelse ved implementering af geonet. Derfor vil de anvendte lagtykkelser med geonet have et højere E-modul, end de tilsvarende uden geonet. Derved er der opnået en besparelse af det ubundne bærelag på henholdsvis 80 og 60 mm på underbundene 1,4 og 7,5 MPa.

11 Økonomi og udledning af CO_2e

I dette kapitel undersøges det, om der er en økonomisk fordel ved anvendelse af geonet og om der en besparelse i udledningen af CO_2-ækvivalenter, CO_2e.

For at sammenligne det økonomiske perspektiv ved anvendelse af geonet til reducering af lagtykkelsen på stabilt grus, er der indhentet priser på materialerne. Fremgangsmåden hertil fremgår i afsnit 2.3. Der i dette afsnit udelukkende undersøgt følgende parametre for økonomi og i udledningen af CO_2e.

- Materialer
- En transportafstand på 40 km for råstoffer og 100 km for geonet, transporteret med en sættevogn 32-40 ton
- Indbygning af materialerne medregnes ikke i den økonomiske betragtning

Der tages udgangspunkt i en 8 m bred vej af en strækning på 10 km. Thomas Ramsøe fra SCT Transport oplyser, at der i 9 ud at 10 tilfælde ved store anlægsprojekter transporters råstoffer med sættevogn, hvorfor der tages udgangspunkt i dette i beregningerne. Der er afgrænset fra at belyse de omkostninger der vil være ved indbygning af materialerne. Der afgrænses fra koblingshøjdens påvirkning på CO_2e og økonomi ved reduceringen af det ubundne bærelag. Derudover er der afgrænset fra den overbredde der vil være nødvendig for at styrke vejopbygningen i kanten. Højden af stabilt grus er vist i tabel 11.1.

Tabel 11.1: Den beregnede lagtykkelse af stabilt grus, jf. kapitel 10, dimensioneret ud fra MMOPP til trafikklasse T5.

Lagtykkelse	Uden geonet	Med geonet
Underbund 1,4 MPa		
Stabilt grus	280 mm	200 mm
Underbund 7,5 MPa		
Stabilt grus	260 mm	200 mm

For at beregne økonomi og CO_2e er det nødvendigt, at definere antal m^2 geonet og m^3 stabilt grus. De belyste geonet produceres ikke i en bredde på 8 m, hvorfor der der beregnes et overlæg på 0,3 m for hvert geonet. Dette giver en effektiv bredde på 8,6 m. Mængderne er angivet i tabel 11.2 for vejopbygning på henholdsvis en underbund på 1,4 MPa og en på 7,5 MPa.

Tabel 11.2: Nødvendige materialer for en 10 km lang og 8 m bred vejopbygning.

Materiale		Uden geonet	Med Geonet
Underbund 1,4 MPa			
Stabilt grus	[m^3]	22.400	16.000
Biaksial geonet	[m^2]	-	86.000
Triaksial geonet	[m^2]	-	86.000
Underbund 7,5 MPa			
Stabilt grus	[m^3]	20.800	16.000
Biaksial geonet	[m^2]	-	86.000
Triaksial geonet	[m^2]	-	86.000

11.1 Økonomisk vurdering ved geonet

Alle priser er for materiale og levering, priserne er inklusiv miljøtillæg og ekskl. moms. Transportafstanden er antaget til 40 km, hvor sættevogne kører i pendulfart mellem grusgrav og anlægsplads. Prisen for transport og køb af stabilt grus er oplyst af SCT Transport. Transportafstanden til anlægsplads for geonet er antaget til 100 km, eftersom Byggros er placeret i Odensen. For geonet oplyses prisen skriftligt af BG Byggros A/S (2023) i marts 2023, afhængigt af geonet type leveret på anlægspladsen, hvor prisen oplyses til være variabel. Priserne for de ubundne bærelag samt geonet på de to underbunde er vist i tabel 11.3.

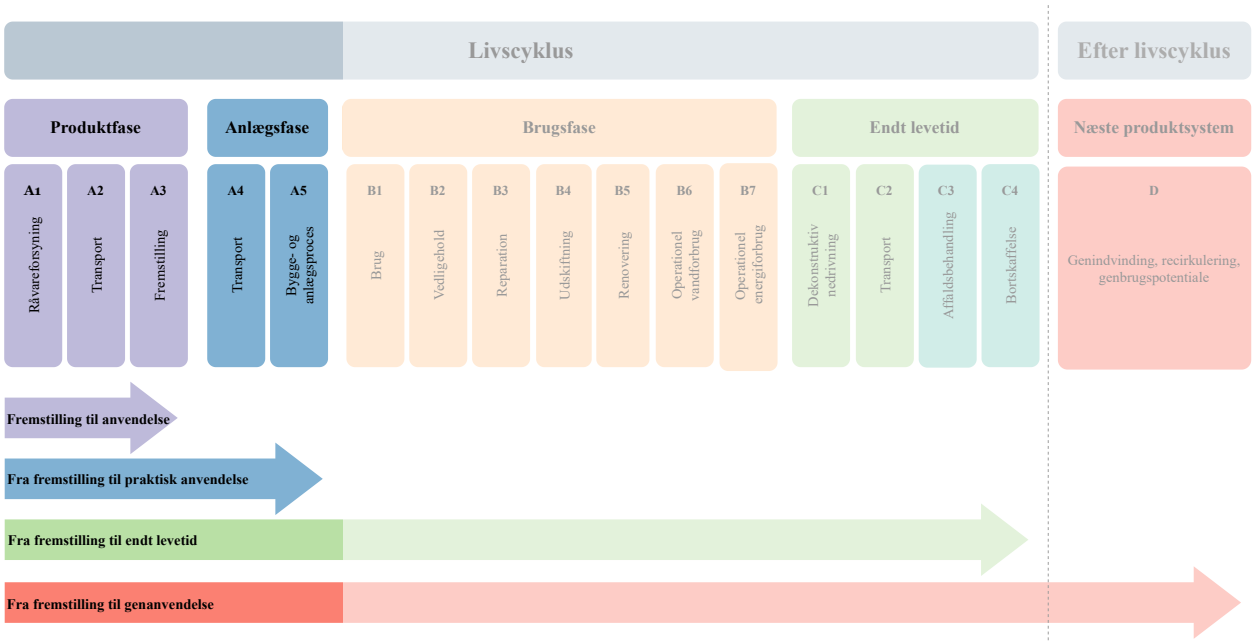
Tabel 11.3: Anlægsoverslag med og uden geonet for en vejstrækning på 10.000 m med en vejbredde 8 m til trafikklasse T5. Der er ikke medregnet indbygning af materialerne. Priserne er uden moms.

Materiale	Enhedspris	Uden geonet	Biaksial geonet	Triaksial geonet
Underbund 1,4 MPa				
Stabilt grus	148 kr. pr. ton	7,00	5,00	5,00
Biaksial geonet	20 kr. pr. m^2	-	1,72	-
Triaksial geonet	30 kr. pr. m^2	-	-	2,58
Total		7,00	6,72	7,58
Procentvis forskel		-	-4,0%	+8,3%
Underbund 7,5 MPa				
Stabilt grus	148 kr. pr. ton	6,50	5,00	5,00
Biaksial geonet	20 kr. pr. m^2	-	1,72	-
Triaksial geonet	30 kr. pr. m^2	-	-	2,58
Total		6,50	6,72	7,58
Procentvis forskel		-	+3,4%	+16,6%

Det fremgår af tabellen, at opbygning med triaksial geonet er dyrere end opbygningen uden geonet dimensioneret i MMOPP. Kun det biaksiale geonet ved underbunden med 1,4 MPa viser en reduktion af anlægsomkostningerne end opbygningen uden geonet dimensioneret i MMOPP. Årsagen til den økonomiske fordelagtighed på underbund af 1,4 MPa er, at der stabilt grus kan reduceres med 80 mm. På den anden underbund på 7,5 MPa kan der kun reduceres med 60 mm. Rent økonomisk vil det derved være den største gevinst ved at anvende det biaksiale geonet grundet prisen er 10 kr. billigere pr. m^2, fordi reduktionen af det ubundne bærelag er 80 mm ved begge geonet. Det triaksiale geonet giver anledning til at reducere lagtykkelsen mere end 200 mm, men da minimumslagtykkelsen for at opnå en styrkeforøgelse med geonet er 200 mm, er det ikke muligt at reducere lagtykkelsen yderligere. Opbygning med triaksial geonet vil derfor opnå et højere E-modul end opbygningen med biaksial geonet, hvorfor der må formodes at være en øget levetid ved anvendelse af det triaksiale geonet. Det økonomiske aspekt medtager kun produkt og transport af materialet, hvorfor indbygningen ikke er medtaget. Indbygning af en større lagtykkelse stabilt grus må forventes at være dyrere eftersom materialet skal komprimeres over flere omgange, hvorfor prisen for indbyggelse af materialerne vil være gunstigt for opbygningerne med geonet.

11.2 CO_2e udledning ved brug af geonet

I dette afsnit vil der beregnes udledningen af CO_2e, ved et MMOPP dimensioneret ubundet bærelag af stabilt grus samt tilsvarende ved indlæggelse af geonet. CO_2e beregnes ud fra LCA-beregninger, hvor der tages udgangspunkt i faser fra A1-D, jf. figur 11.1.



Figur 11.1: Materialers livscyklus opdelt i faser ud fra LCA.

Der anvendes i dette afsnit InfraLCA-programmet, som er udarbejdet af Banedanmark og Vejdirektoratet. InfraLCA er et program til at beregne en livscyklusanalyse, Life Cycle Assesment, primært målrettet danske aktører til planlægning, drift og anlæg af infrastruktur. InfraLCA-værktøjet anvendes i vejbranchen til basisoverslag af udledning af CO_2e. CO_2e er en definition, som dækker over en samlet værdi for forskellige drivhusgasser. Der er i dette afsnit udelukkende valgt at beregne udledningen i fase A, produkt- og anlægsfasen, som tydeliggjort i figur 11.1. Programmet beregner som standard GWP50, global opvarmningseffekt, hvilket er defineret ved klimapåvirkning opgjort i en betragtningsperiode på 50 år (Vejdirektoratet, 2023).

Programmet anvender miljøvaredeklarationer, Environmental Product Declaration, EPD, til udregning af CO_2e udledning i de forskellige faser.

EPD fra produktfasen af materialerne kan findes produktspecifikt for henholdsvis biaksial og triaksial, for stabilt grus er anvendt en branche EPD, fordi det ikke har været muligt at fremskaffe en produktspecifik EPD. EPD'erne fremgår af 11.4.

Tabel 11.4: Produktspecifik EPD på geonet og branche EPD på stabilt grus, Hvilket er grundlaget for CO_2e i produktfasen.

EPD	[kg CO_2e/m^2]	[kg CO_2e/m^3]
Stabilt grus	-	7,34
Biaksial geonet	1,01	-
Triaksial geonet	0,52	-

EPD'erne for faserne A4 og A5 fremgår af appendiks F, som er defineret af infraLCA.

Den samlede beregning af CO_2e for en vejopbygning med og uden geonet fremgår af tabel 11.2.

Tabel 11.5: Antal CO_2e for en vejopbygning til trafikklasse T5 på 10 km lang og 8 m bred i produktfase og anlægsfase.

Udledning af CO_2e [ton CO_2e]			
Fase	Katalogmetode	Biaksial	Triaksial
Underbund 1,4 MPa			
A1-A3	176,5	213,1	170,8
A4	222,9	159,9	159,9
A5	5,9	4,2	4,2
Total	405,2	377,2	334,9
Procentvis forskel	-	-6,9%	-17,4%
Underbund 7,5 MPa			
A1-A3	163,9	213,1	170,8
A4	206,9	159,9	159,9
A5	5,5	4,2	4,2
Total	376,3	377,2	334,9
Procentvis forskel	-	+0,2%	-11,0%

Det fremgår af tabellen, at udledningen af CO_2e øges lidt ved indlæggelse af et biaksial geonet på underbunden 7,5 MPa, hvorimod det triaksiale geonet reducerer udledningen mest og gør det på begge underbunde. Der er i beregningerne antaget, at stabilt grus leveres med det optimale vandindhold, jf. appendiks C. Tages der udelukkende udgangspunkt i udledningen af CO_2e, så vil det være den bedste læsning at anvende det triaksiale geonet, når der bygges på en underbund med en styrke på ca. 1,4 eller 7,5 MPa.

11.3 Resultatsammenfatning

Ved sammenligning af det anlægs økonomiske og udledningen af CO_2e på en vejopbygning med og uden geonet fremgår den procentvise forøgelse eller reducering af tabel 11.6.

Tabel 11.6: Procentvis forskel ved indlæggelse af geonet ud fra en økonomisk betragtning og udledningen af CO_2e ved reducering af stabilt grus og indlæggelse af geonet.

	Underbund 1,4 MPa		**Underbund 7,5 MPa**	
	Biaksial	Triaksial	Biaksial	Triaksial
Økonomi	-4,0%	+8,3%	+3,4%	+16,6%
CO_2e	-6,9%	-17,4%	+0,2%	-11,0%

Det kan konkluderes, at det ud fra et økonomisk perspektiv kun er en økonomisk fordel at implementere det biaksiale geonet i stabilt grus, hvis det drejer sig om en underbund med et E-modul på 1,4 MPa. Ud fra en betragtning om antallet af udledning af CO_2e, kan geonet med fordel anvendes, hvor der kun er en lille stigning af CO_2e i tilfældet, hvor der anvendes biaksial geonet på en underbund på 7,5 MPa. Det bemærkes, at det triaksiale geonet giver den største reduktion på CO_2e, men tilsvarende giver den største meromkostning.

Den økonomisk fordelagtige løsning er det biaksiale geonet, men hvis der sammenlignes med udledningen af CO_2e er det den løsning med geonet, der giver den største udledning. Dette er grundet EPD for det triaksiale geonet, jf. tabel 11.4, som udleder markant mindre CO_2e end et biaksial geonet. Samtidig observeres det på enhedsprisen i tabel 11.3, at det triaksiale geonet er 10 kr. pr. m^2 dyrere end det biaksiale geonet.

Hvis der udelukkende observeres ud fra et miljømæssigt perspektiv, kan det anbefales at indlægge et geonet, særligt af triaksial struktur i det ubundne bærelag, stabilt grus. Hvis der derimod udelukkende fokuseres på materialebesparelse af stabilt grus anbefales det, at anvende geonet, da det styrker materialets stivhed og giver anledning til reduktion uden at gå på kompromis med vejens bæreevne. Rent økonomisk vil det kun være en fordel at anvende geonet, hvis det er en underbund med styrken 1,4 MPa og der vælges det biaksiale geonet. Det endelige valg afhænger af de undersøgte parametre som materialebesparelse, CO_2e og økonomi samt prioriteringen herimellem.

12 Diskussion

Der er i dette speciale undersøgt, hvordan geonet kan reducere lagtykkelsen og hvilken påvirkning anvendelsen af geonet har på anlægsøkonomi og udledning af CO_2e. Dette er belyst igennem et litteraturstudie, udførte fuldskala laboratorieforsøg og efterfølgende databehandling. Forsøg er udført i en trækasse, med stabilt grus og geonet oven på en simuleret blød bund af ekspanderet polystyren, EPS, og derunder baskarpsand, som simulerer en stivere underbund. Forsøgopbygningen er belastet med en hydraulisk aktuator, resultaterne er anvendt til at bestemme E-modulet. Der er i litteraturstudiet præsenteret forsøgsopbygninger og resultater fra geonettets indvirkningen. I det følgende vil litteraturstudiets resultater og erfaringer holdes op imod resultaterne fra dette speciale.

12.1 Statisk og cyklisk belastning

Der er i litteraturstudiet belyst resultater fra fuldskala laboratorieforsøg, som har testet geonettets indvirkning i det ubundne bærelag på blød bund. Her fremgår det, at forsøgene til test af geonet overordnet er inden for samme fremgangsmåde, da det belyste litteratur udføre test i en fuldskala testboks med en hydraulisk aktuator til pladebelastning. Det er erfaret, at de fleste studier belyser deres resultater i en armeringseffekt, TBR. Ligledes har de fleste studier kun udført cyklisk pladebelastning, hvorfor de ikke har udført statisk pladebelastning. Dette må formodes at være fordi, at blød bund sætter sig over tid, og en vej belastes med trafik, som kan simuleres til cykliske belastninger. Derved observeres deformationen i en armeret og uarmeret situation over tid og kan give en identifikation af hvordan opbygningen vil reagere på trafikbelastning. Studierne har enten anvendt 1.000 cyklus som grænse, eller valgt en maksimal deformation i intervallet 19-70 mm. I flere af forsøgene er der valgt en belastning, som er sammenlignelig med et hjultryk fra et 10-tons akseltryk. Ud fra litteraturstudiet er det i de udenlandske studier kutyme at undersøge geonettets indvirkning ud fra en armeringseffekt, TBR.

Studierne beviser, ligesom dette speciale, at der kan opnås en tydelig forbedring ved indlæggelse af geonet. Forbedringen kommer til udtryk ved, at der skal udføres flere cykliske belastninger før en given deformation opnås. Forsøgene belyst i litteraturstudiet, tester effekten ved indlæggelse i det ubundne bærelag og et enkelt studie, hvor der er testes på en komplet vejopbygning. Resultaterne viser en armeringseffekt, på 5-8, hvorfor der skal udføres 5 til 8 gange flere cyklus med indlagt geonet, for at opnå den samme deformation, jf. Qian et al. (2013); Woon-Hyung et al. (2006). Resultaterne viser derfor omkring den samme forbedring ved indlæggelse af geonet i det ubundne bærelag. Det fremgår i et af studierne, at der opnås en større effekt ved at placere geonet i den øverste tredjedel af det ubundne bærelag på 310 mm (Woon-Hyung et al., 2006). Flere af de andre studier viser, at der opnås en forbedring ved at placere geonettet i grænsefladen mellem bundsikring og stabilt grus, hvorfor placeringen må afhænge af lagtykkelsen på det ubundne bærelag. Studierne viser, at de triaksiale geonet opnår den største forøgelse af stivheden grundet maskestrukturen. Studierne har testet råstoffer med grusfraktioner, som kan forkile sig i geonettets masker. Et enkelt studie viser, at ikke er forskel på implementering af geonet i bundsikringssand og stabilt grus (Baltzer, 2005). Dette resultat bør tages med forbehold, fordi forsøget er udført i mindre skala og med mini faldlod, hvorfor det er udført med andre forudsætninger end der anvendes i studierne og i dette speciale. Der er i dette speciale udført forsøg med statisk pladebelastning, eftersom det også er den anvendte testmetode i vejregler, som bruges til vejledning under dimensionering. Derfor kan resultaterne fra dette speciale bruges til sammenligning og til en vis grad supplering af vejregler.

12.2 Mængden af stabilt grus

I litteraturstudiet fremgår det, at flere af laboratorietestene der er udført i udlandet, har anvendt en variation i lagtykkelsen af det det ubundet bærelag. Der er i studiet, gennemgået i afsnit 3.2, anvendt en lagtykkelse på 460 mm, hvilket er næsten dobbelt så meget, som det ubundet bærelag i Danmark normalvis dimensioneres til en trafikklasse T5 (Ad hoc-gruppe Vejregelgruppe Dimensionering, 2022). Derfor kan dette resultat virke irrelevant, men forsøget giver en alligevel identifikation af, at der stadig kan opnås en effekt af geonet ved denne lagtykkkelse. Forsøgene viser, at deformationen reduceres mest ved en lagtykkelse på 300 mm stabilt grus. Her reduceres deformationen med 20 mm i modsætningen til lagtykkelsen på 460 mm, hvor reduktionen er omkring 12 mm, ved det samme antal cykliske belastninger.

Studiet fra afsnit 3.3 undersøger geonet indlagt under en lagtykkelse på 150-300 mm ubundet bærelag. Forsøget med en lagtykkelse på 150 mm stabilt grus oven på geonettet viser en armeringseffekt ved det stærkeste geonet på 1,6. Denne armeringseffekt er relativ lille i forhold til de andre resultater fra lagtykkelser på henholdsvis 230 mm og 300 mm. Resultatet for det samme geonet ved en lagtykkelse på 230 mm er armeringseffekten 8. Armeringseffekten ved 300 mm er tilsvarende 8,7.Det fremgår, både fra dette studie, speciales forsøgsresultater ved test med 100 mm stabilt grus oven på geonettet og Byggros anbefaling, at der ikke opnås en tilstrækkelig styrkeforøgelse ved mindre 200 mm stabilt grus oven på geonettet.

Erfaringer fra Vejdirektoratet af Baltzer (2005), beskriver en situation, hvor der er anvendt geonet på en almindelig underbund. Resultaterne viser, at de ikke har observeret en forskel i styrken efter indlæggelse af geonet. Der er i specialet ikke belyst om geonettet har indvirkning på andre underbunde end blød bund, hvorfor bæreevneforøgelsen ikke kan beregnes for andre underbunde end de undersøgte. Vejdirektoratet har ikke undersøgt styrkeforøgelsen afhængigt af levetiden, hvorfor der ikke kan drages erfaringer herfra.

12.3 Styrkeforøgelse afhænger af belastning

Studiet, gennemgået i afsnit 3.5, har testet styrken af geonet ved flere forskellige belastninger. Her observeres det, at der med det samme geonet opnås en større forbedring fra den uarmerede til den armerede situation, hvis den påførte belastningen øges. Uddrag fra forsøgsresultaterne viser, at styrkeforøgelsen stiger fra 23% til 39%, når for kontakttrykket øges fra 0,137 til 0,345 MPa. Denne belastning er sammenlignelig med belastningen i dette speciale, som er henholdsvis 0,14 og 0,34 MPa. Resultaterne fra de cykliske belastninger viser ligeledes, at der er større forskel i deformation fra den uarmerede til den armerede situation ved en større belastning. Derfor beviser resultaterne fra både specialet og litteraturstudiet, at geonet forøger bæreevnen og har en større styrkeforøgelse ved en større trafikbelastning.

12.4 Placering af geonet

Byggros erfaringer og anbefalinger er, at der placeres mindst 200 mm ubundet materiale oven på geonettet, for at opnå en bæreevneforøgelse. Studiet beskrevet i afsnit 3.3 viser, at der opnås en forbedring af stivheden for alle forsøg med indlagt geonet, med en større styrkeforøgelse ved en lagtykkelse over 200 mm. Størrelsen på bæreevneforøgelsen afhænger af stivheden på geonettet og maskestørrelsen. Studiet gennemgået i afsnit 3.4 viser, at når der testes med 300 mm over geonettet opnås den største styrkeforøgelse fra uarmerede tilstand ved at placere geonet i den øverste tredjedel af det ubundne bærelag. Studiet, gennemgået i afsnit 3.3, viser, at der opnås næsten samme deformation ved 230 mm stabilt grus, som ved 300 mm stabilt grus placeret oven

på geonettet. Forsøgene udført i dette speciale har en en lagtykkelse 200-300 mm oven på geonettet og en varieret stivhed af underbunden. Resultater viser herfra, at der opnås en større procentvis forbedring ved underbunden på 1,4 MPa end ved underbunden på 7,5 MPa. Alle resultaterne viser, at der opnås en forbedring fra 28-58% ved indlæggelse af geonet.

12.5 Byggros anbefalinger og forsøgsresultater

I kapitel 6 er designdiagrammer fra de to anvendte geonet gennemgået. Byggros besparelser sammenlignes med de besparelser der kan opnås ud fra de beregnede lineære tendenslinjer jf. kapitel 9. De lineære tendenslinjer er foretaget ud fra få datapunkter og for underbunde på 1,4 MPa og 7,5 MPa, hvilket giver en hvis usikkerhed i sammenhængen. Byggros designdiagrammer har derimod flere testforsøg bag sig, hvilket kan give mere reelt billede af den faktiske besparelse. Byggros designdiagrammer er ikke lineære, hvilket kan være på grund af de mange datapunkter som ligger bag udformningen af grafen. Der er i dette speciale antaget en lineær sammenhæng, grunde de få datapunkter, hvilket giver en større usikkerhed i sammenhængen.

Der er aflæst i Byggros designdiagrammer for belastningsklasse 5 og de specifikke geonet, med henholdsvis 1,4 MPa og 7,5 MPa styrke på planum. Besparelserne fra diagrammerne fremgår i tabel 12.1. Beregningen som ligger til baggrund for besparelsen er uddybet i appendiks G.

Tabel 12.1: Aflæste ækvivalente lagtykkelser jf. designdiagrammer af BG Byggros A/S (2023) sammenlignet med de lineære tendenslinjer beregnet i kapitel 9.

Type	Byggros	Lineær tendens
Underbund på 1,4 MPa		
Opbygning uden geonet	-	-
Biaksial opbygning	167 mm	155 mm
Triaksial opbygning	183 mm	207 mm
Underbund på 7,5 MPa		
Opbygning uden geonet	-	-
Biaksial opbygning	117 mm	110 mm
Triaksial opbygning	133 mm	139 mm

Det observeres, at der ud fra Byggros designdiagrammer kan opnås en besparelse i det ubundne bærelag, stabilt grus, på ca. 117-183 mm. Det blev bevist i kapitel 10, at stabilt grus lagtykkelsen kan reduceres med 60-80 mm, når der tages udgangspunkt i en MMOPP-dimensionering og hensyn til en minimumslagtykkelse på 200 mm. Anvendes de tidligere opstillet lineære tendenslinjer fås en besparelse på ca. 110-207 mm. Ud fra tabel 12.1 fremgår det, at de beregnede besparelser er relativt tæt på hinanden. Specialets forsøgsresultaterne bekræftes dermed af designdiagrammerne for de undersøgte underbunde. Dermed er de lineære sammenhænge fra dette speciale sammenlignelige med designdiragrammer fra Byggros.

12.6 Grusfraktioner i geonet

Ph.d. projektet præsenteret i afsnit 3.1. Studiet beskriver, hvordan et geonet optager kræfterne igennem grusfraktionerne og vigtigheden af, at geonettet omkranses både på oversiden og undersiden. Flere af studierne viser en effekt ved at blot at indlægge geonettet i grænsefladen mellem bundsikring og stabilt grus. Ligeledes fremgår det, at korn- og maskestørrelse skal passe sammen for at opnå en låsningseffekt i maskerne. Anbefalingen er, at 1,4x maskestørrelsen skal være størrelsen på de største grusfraktioner. Specialets anvendte geonet har for det biaksiale geonet

en maskestørrelse på 34x34mm, hvilket giver et krav om en maksimal kornstørrelse på 48 mm. For det triaksiale geonet er maskestørrelsen 40x40mm, hvilket giver en kornstørrelse på 56 mm. Der er i specialet anvendt stabilt grus af klassifikation II, som indeholder en maksimal kornstørrelse på 32 mm. Derfor er der ifølge ph.d. projektet anvendt for små grusfraktioner til at kunne opnå den mest optimale låsningseffekt af grusfraktionerne i geonettet. Byggros anbefaler til deres geonet, at anvende stabilt grus 0-32 mm som ubundet bærelag og bundsikringssand 0-8 mm. Ligeledes forskriver de, at der kan anvendes sprængsten, knust beton eller lignende af med en maksimal kornstørrelse på 64 mm, som også kan findes i stabilt grus II. Derfor har stabilt grus II potentiale til at opfylde kravet om en maksimal grusfraktion på 48-56 mm, selvom der i sigteanalysen ikke er observeret grusfraktioner over 32 mm. Ved indlæggelse af geonet i bundsikringssand 0-8 mm overholdes anbefalingerne fra ph.d. projektet om størrelsen på grusfraktionerne ikke, selvom det er en anbefaling fra Byggros.

Umildbart overholder ingen af studierne denne anbefaling, som tværtimod har finere grusfraktioner end stabilt grus, hvorfor der ikke kan konstateres, hvorvidt denne forudsætning om maskestørrelse x 1,4 har en effekt på resultatet. Amerikanske vejregler anbefaler kornstørrelser mellem 13-76 mm for at opnå en låsningseeffekt, hvilket er større end Byggros anbefaling til de maksimale grusfraktioner og ligeledes større end deres anbefaling til de mindste grusfraktioner.

Ph.d. studiet belyser ligeledes, at stivheden og ribbeformen af geonettet har en afgørende betydning for den samlet forbedring ved indlæggelse af geonet. Studiet beskriver, at det triaksiale geonet opnår en større styrke end det biaksiale geonet, fordi det triaksiale geonet virker tredimensionelt og det biaksiale geonet virker diagonalt. Det er ligeledes Byggros erfaring, at de triaksiale geonet opnår større styrkeforøgelse end de biaksiale geonet jf. figur 5.1. Studierne som testede forskellen på de biaksiale og triaksiale geonet viste samme resultat, at de triaksiale geonet opnår den største styrkeforøgelse. Ligeledes viser forsøgene i dette speciale, at den største styrkeforøgelse opnås med det triaksiale geonet, til trods for, at begge geonet er beregnet til samme belastningsklasse 5. Forskellen på styrkeforøgelsen af geonettene viser, at det triaksiale geonet opnår en 10-20 procentpoint større styrkeforøgelse end det biaksiale geonet.

Geonettets stivhed har ligeledes stor betydning for den opnået styrke. Ifølge ph.d. projektet, stemmer denne erfaring overens med de studier, som har testet flere forskellige triaksiale geonet. Her har de geonet med størst stivhed også opnået den mindste deformation eller har modstået flest antal cykliske belastninger inden den maksimale deformation er opnået. Byggros har inddelt deres geonet efter belastningsklasse, hvor belastningsklassen også afhænger af stivheden, jo større belastning jo større stivhed af geonettet.

12.7 Vejreglers anbefaling

Vejreglernes anbefaling til indlæggelse af geonet er ikke eksisterende. De danske vejregler beskriver ikke noget om implementering af geonet i vejopbygningen. De norske vejregler beskriver, at indlæggelse af geonet kan give anledning til reducering af bundsikring. Hvilket ikke stemmer overens med, at grusfraktioner bør forkile sig i geonettet og at bundsikring er for at dræne og sikre vejkasse mod frost. De amerikanske vejregler, anbefaler at indlægge geonet mellem planum og bundsikring, hvilket er en anbefaling der i litteraturstudiet modbevises, eftersom den største bæreevneforøgelse sker ved indlæggelse af geonet imellem bundsikring og det ubundne bærelag. Ligeledes har de amerikanske vejregler ingen standard for, hvornår det er fordelagtigt at anvende. De har observeret god effekt ved indlæggelse af geonet både ved statisk og cyklisk pladebelastning. Ligeledes suppleres deres erfaring ved indlæggelse af geonet med et studie, som viser en reduktion

på 150 mm af det ubundne bærelag ved indlæggelse af et biaksial geonet (Huntington og Ksaibati, 2000).

12.8 Forsøgsresultater

Der er i dette speciale undersøgt geonet indlagt på blød bund med en styrke på 1,4 og 7,5 MPa, hvorfor der ikke nødvendigvis kan forventes, at det vil være den samme forøgelse af stivheden ved indlæggelse af geonet på andre styrker underbund. Geonet viser ved indlæggelse en bæreevneforøgelse af den samlede opbygnings E-modul på mellem 28 og 58 %, hvor det triaksiale geonet viser den største styrkeforøgelse og derved det bedste geonet til at optage spændinger og tøjninger i et ubundet bærelag af stabilt grus. Det bevises ud fra forsøgsresultaterne og litteraturstudiet, at det triaksiale geonet øger styrken af det ubundne bærelag mere end et biaksial geonet gør. Flere af de undersøgte studier undersøger geonettets indvirkning på en blød bund. De fleste studier har undersøgt en underbund på omkring 7,5 MPa, men det er for dette speciale unikt, at der undersøges to forskellige typer blød underbund. Derudover er det unikt, at netop effekten af to geonet til en belastningsklasse 5, et biaksial og et triaksial, undersøges ift. en uarmerede tilstand i det ubundne bærelag, stabilt grus. Det kan diskuteres, hvorvidt der burde være undersøgt en stærkere underbund, som er mere lig den underbund, der kan findes ved en virkelig vejopbygning. Anders Kjeld, direktør for BG Byggros udtaler, at en underbund på 7,5 MPa vil være blød, men at en underbund på 1,4 MPa vil være en særdeles dårlig underbund. Det kan derfor diskuteres, hvorvidt det havde været tilstrækkeligt at undersøge underbunden 7,5 MPa, som vil være mere lig de blødbundsforhold, som der vil kunne anvendes til anlæggelse af en vejopbygning, eller om der i stedet skulle være brugt et helt andet materiale eller en faktisk jordtype til at simulere underbunden.

Producenten Jackon (2023) har opgivet E-moduler for pladerne af ekspanderet polystyren, hvor de anvendte plader har et oplyst E-modul på henholdsvis 2 og 7,5 MPa. Forsøgsresultaterne bekræfter E-modulerne med resultater på henholdsvis 1,4 og 7,5 MPa. Det kan ligge op til diskussion, om der burde være anvendt et materiale med højere E-modul til at simulere blød bund. Statisk pladebelastning udføres for at kontrollere materialets deformationsegenskaber, og det giver mulighed for at belaste materialet til brud, hvorfor denne metode har været foretrukket til dette speciale. Derudover kunne der være lavet flere forsøg med statisk pladebelastning på den samme forsøgsopbygning for at undersøge variationen i E-modulet.

Ud over at E-modulet kan være påvirket af metoden, så er det tidligere beskrevet, hvordan der ikke regnes med deformation af det underliggende baskarpsand i forsøgsopbygningen. Sandet er blevet planet ud til forsøgsopbygningerne og har tidligere været anvendt til forsøg, hvorfor det må forventes, at det til en vis grad er blevet komprimeret. Rækkefølgen af forsøgsopbygningerne, gennemgået i kapitel 7, må forventes at have en betydning for deformationen af sandet. Forsøgsudførelsen vil formentlig lede til løbende komprimering af det underliggende baskarpsand. I så fald vil der være en fejlkilde, særligt på de tidligt udførte forsøg, hvor der i et uvist omfang er blevet målt på E-modulet af det underliggende baskarpsand. Derved vil de målte E-moduler formentlig være lavere, fordi der kan være forekommet deformation af det underliggende baskarpsand. Det skal dog bemærkes, at det underliggende sand i forsøgsbeskrivelsen simulere en stivere underbund, ligesom det vil være tilfældet ved blød bund i felten.

De cykliske pladebelastninger viser en armeringseffekt på omkring 4 for henholdsvis biaksial og triaksial geonet på underbunden på 7,5 MPa og det biaksiale geonet på underbunden på 1,4 MPa. Hvor det triaksiale geonet på underbund på 1,4 opnår en armeringseffekt op til 17,8. Det er dog

uden at belaste med en belastning svarende til et 10-tons akseltryk. De cykliske resultater viser ikke så stor forskel på det triaksiale og det biaksiale geonet, som resultaterne fra statisk pladebelastning, hvor det triaksiale geonet viser større stivhed og derved E-modul. Dette må være fordi, at der kun belastes med 1.000 cyklus og en forholdsvis lav kraft, som har gjort, at forskellene ikke er så store som i resultaterne fra statisk pladebelastning, hvor der er belastet til brud. Resultaterne fra cyklisk pladebelastning viser dog stadig en forbedring fra den uarmrede tilstand, som ligner studierne, hvorfor geonettet også viser en øget stivhed over tid med gentagende belastninger.

12.9 Branchens holdning til geonet

Når geonet i vejbranchen nævnes optræder en skepsis og delte holdninger. Erfaringen hos de rådgivende ingeniører er, at det ikke er den første løsning der vælges, eftersom der mangler en beregningsmetode ved indlæggelse af geonet i vejopbygningen. Yderligere fralægger producenten sig ansvaret fra den vejledende styrkeforøgelse ved indlæggelse af geonet. Som det er nu, så anvendes geonet med udgangspunkt i tidligere erfaringer, og som ekstra styrkeforøgelse ved vejanlæg på blød bund. Under interview med Vejdirektoratet fremgår det, at de ikke har erfaringer med indlæggelse af geonet med formålet om at reducere det ubundne bærelag. Vejdirektoratet fortæller, at hvis de skal anlægge en vej på blød bund, graver de den bløde bund væk, som efterfølgende erstattes med fyldmateriale. De økonomiske beregninger, har vist, at der forekommer en meromkostning ved indlæggelse af geonet, hvis der udelukkende medtages besparelse af stabilt grus. Derved kan prisen eventuelt neutraliseres. hvis der medtages de økonomiske tillæg ved bortgravning og bortskaffelse af blød bund samt tilkøb, transport og indbyggelse af fyldjord. Pris for geonet i vejopbygningen, er 3-16 % dyrere end en vejopbygning uden. Kapitel 8, viser et beregningseksempel ved indlæggelse af et biaksial geonet, hvor der kan spares 4% af den samlet pris. Denne beregning er ikke den mest fordelagtige, hvis vurderingen af CO_2e medtages. Ved at vurdere både det økonomiske og udledningen af CO_2e i en betragtning omkring det mest fordelagtige valg, er det indlæggelse af biaksial på en underbund med 1,4 MPa som anbefales. Det triaksiale geonet viser en større styrkeforøgelse, men fordi der er fundet en minimumslagtykkelse af stabilt grus på 200 mm ved geonet indlagt er det fulde potentiale for reducering uudnyttet. Yderligere er det triaksiale geonet 10 kr. dyrere pr. m^2 hvilket gør at anlægsomkostningerne stiger med 8-17%. Udledningen af CO_2e reduceres med henholdsvis 11-17% ved anvendelse af det triaksiale geonet, hvorfor det triaksiale geonet er mere fordelagtigt ved udelukkende at medtage udledningen af CO_2e.

Vejdirektoratet redegør i deres interview, jf. kapitel 4, at hvis det kan bevises, at geonet kan reducere lagtykkelsen af grus, vil løsning godt kunne komme i betragtning. Dette speciale har vist, at der er en effekt på styrken ved geonet implementering på underbunde af 1,4 og 7,5 MPa.

En anden bekymring for Vejdirektoratet er vedligeholdelse og ledningsarbejde i vejopbygninger med geonet. I den forbindelse blev forhandleren af geonet spurgt ind til, hvordan dette i praksis fungerer. Her er svaret, at entreprenøren, blot skal gøre som normalvis, eftersom en gravemaskine nemt vil kunne grave igennem nettet. Under genetablering kommer der en lille forskel. Her skal geonettet genetableres, ved indlæggelse af et nyt geonet i det gravede område med et overlap på 30 cm. Herved genetableres bæreevneforøgelse forårsaget af geonettet, hvorfor det ifølge forhandleren ikke et problem. Udfordringen er, at det i nogen tilfælde vil være økonomisk tungere, at indlægge et geonet, hvis der udelukkende medtages geonettes besparelse af stabilt grus. Denne betragtning afhænger af transportafstanden af materialerne, samt eventuel blød bund der skal fjernes. Erfaringer fra kapitel 6 viser, at det biaksiale geonet vejer mere pr. m^2 end det triaksiale

geonet, samtidig med at være produceret i det samme materiale, polypropylen. Dette betyder, at der anvendes mere plastik til at fremstille det biaksiale geonet. Alligevel er det biaksiale geonet billigere end det triaksiale. Byggros besvarer dette skriftligt med, at prisen afhænger af patenter, udbud/efterspørgsel, transport og produktion. Det oplyses, at patentet på det triaksiale geonet har stor indvirkning på prisen. Patentet udløber i indeværende år, hvorfor prisen ifølge om et par år forventes at falde med ca. 40% og derved næsten samme pris, som det biaksiale. Derfor kan det triaksiale geonet blive mere attraktiv at anvende, da det samtidig giver en markant større reduktion i udledningen af CO_2e.

Vejdirektoratet arbejder, som tidligere beskrevet, ikke på vejregler for indlæggelse af geonet i de ubundne lag. Det gør de ikke, fordi der mangler erfaring på området og en vejregel skal afspejle de gængse metoder i branchen samt, at der ikke har været efterspørgsel på dette. Vejdirektoratet har tidligere udført forsøg med geonet på en strækning på en almindelig underbund under anlæggelse af Hirtshals Motorvej 3.8. Typen af underbund kan være grunden til, at der ikke kunne måles en styrkeforskel på vejopbygningen med og uden geonet. Derfor har Vejdirektoratet ikke undersøgt de videre muligheder for at indlægge geonet i de ubundne materialer. Dette speciale har bevist, at der er mulighed for at reducere det ubundne bærelag, stabilt grus på blød bund, når der indlægges geonet i vejopbygningen anlagt på blød bund. Derfor kan Vejdirektoratet med fordel undersøge muligheden for indlæggelse af geonet ved tilsvarende forhold af blød bund.

12.10 FN's verdensmål

Der vil i dette afsnit diskuteres, hvorvidt dette speciale har potentiale til at bidrage til nogle af FN's, Forenede Nationers, 17 verdensmål. Udvalgte verdensmål er fremhævet på figur 12.1.

Figur 12.1: Udvalgte FN verdensmål, som specialet her potentiale til at bidrage til (UNDP's nordiske kontor, 2023).

Specialet har potentiale til at bidrage til verdensmål 9, industri, innovation og infrastruktur, ved at der med dette speciale søges en besparelse i materialer der i større grad slipper op, hvor der undersøges, om det er en økonomisk og miljømæssig fordel at anvende geonet. Resultaterne viser, at der er et potentiale for at reducere det ubundne bærelag, stabilt grus, med mellem 60 og 80 mm afhængigt af jordtype og -styrke, når der udføres vejanlæg på blød bund. Der er derfor med en implementering af et supplerende materiale fundet en besparelse af de ikke uendelige naturlige råstoffer i stabilt grus. Der er i de fleste tilfælde ikke fundet en økonomisk besparelse

ved indlæggelse af geonet, udelukkende ud fra besparelse af stabilt grus, hvorfor det er svært at argumentere for, at dette speciale entydigt bidrager til verdensmål 9. Hvis der derimod, i flere af de undersøgte opbygninger, havde været en både økonomisk fordel og CO_2e reduktion ville dette speciale i større grad bidrage til industri, innovation og infrastruktur.

Potentialet for at bidrage til verdensmål 12, ansvarligt forbrug og produktion, handler om, at jordens naturlige råstoffer ikke er uendelige. Samtidig stiger forbruget fra verdens befolkning og behovet for mobilitet stiger tilsvarende. Specialet afsøger en mere ansvarlig og materialebesparende løsning ved vejopbygning på blød bund, hvilket stemmer overens med verdensmål 12. Samtidig er mobiliteten stigende, hvilket medfører et behov for anlæg af nye og bredere veje til biler, busser og lastbiler. Dette speciale viser, at det ved indlæggelse af geonet i det ubundne bærelag af stabilt grus på blød bund kan spares på CO_2e i større eller mindre grad. Dermed har specialet resultater potentiale til at bidrage til et mere ansvarligt forbrug og produktion, når der anlægges nye veje.

Verdensmål 13, klimaindsats, har dette speciale potentiale til at bidrage til, fordi der søges en løsning ved etablering af vejanlæg på blød bund, hvor aftrykket i CO_2e reduceres, og derved afsøges potentialet for at reducere CO_2e aftrykket ved nyanlæg. Regeringens infrastrukturaftale frem mod 2035 indeholder store investeringer, herunder er ca. 64 mia. kr. allokeret til vejanlæg, bl.a. med udvidelse af dele af motorvej E45 og opstart på anlæggelse ny midtjysk motorvej Finansministeriet (2021). Det er derved ikke et spørgsmål om, hvorvidt de nye vejanlæg skal udføres, men hvordan. Specialet resultater fra det beregnede CO_2e aftryk i produkt- og anlægsfasen viser, at aftrykket kan reduceres ved indlæggelse af geonet i det ubundne bærelag, stabilt grus og særligt ved indlæggelse af triaksial geonet. Dermed kan der argumenteres for, at dette speciale har potentiale til at bidrage til verdensmål 13.

12.11 Bidrag til klimamål og yderligere potentiale

Regeringen, Socialdemokratiet, Dansk Folkeparti, Radikale Venstre, Socialistisk Folkeparti, Enhedslisten, Det Konservative Folkeparti og Alternativet indgik i 2020 aftalen om klimaloven. Klimaloven indebærer, at Danmark skal reducere sin drivhusgasudledning, CO_2e, med 70% i 2030 med udgangspunkt i 1990. Samtidig skal Danmark senest i 2050 opnå klimaneutralitet (Klima-, Energi- og Forsningsministeriet, 2023). Specialet bidrager til klimamålene, fordi infrastrukturplanen ligeledes er besluttet, hvorfor dette speciale kan bidrage til en CO_2e reduktion af det ubundne bærelag, stabilt grus, i produkt- og anlægsfasen, når der udføres en vejopbygning på blød bund.

Ud over den belyste reduktion ved en dimensionering i MMOPP, så kan geonet potentielt bidrage til en større materialebesparelse og derved reducere indvinding af råstoffer. Interview med Vejdirektoratet i kapitel 4 afslørede, at der ofte graves store mængder blød bund op og i stedet anvendt alternative materialer. Her kan der være en endnu større materiale- og ressourcebesparelse ved at lade den bløde underbund ligge og i stedet bygge et geonet ind. Det er tidligere beskrevet, at transport af materialer er både dyrt økonomisk og i udledningen af CO_2e. I afsnit 11.2 fremgår det, at der er en besparelse helt op til 16% i udledningen af CO_2e ved indlæggelse af geonet i vejopbygning. Denne besparelse er udelukkende fra reduktion af lagtykkelsen på stabilt grus. Hvis der som Vejdirektoratet graves blød bund væk og tilkøres fyldmaterialer, må besparelsen i CO_2e formodes at være endnu større.

13 Konklusion

I det indledende af rapporten er der opstillet undersøgelses spørgsmål, som specialet har forsøgt besvaret igennem et litteraturstudie, erfaringer fra branchen, testforsøg i laboratorie og databehandling af forsøgsresultater. I konklusionen præsenteres konkrete svar på de opstillede undersøgelsesspørgsmål.

- *Hvor stor en bæreevneforøgelse kan der opnås ved implementering af geonet af polypropylen på blød bund?*
- *Hvad er forskellen i bæreevneforøgelsen ved henholdsvis et biaksial geonet og et triaksial geonet?*
- *Hvor meget kan geonet reducere lagtykkelsen af grusmaterialer i vejens ubundne bærelag på blød bund?*
- *Hvordan kan reduceringen ske uden at gå på kompromis med vejens bæreevne og dermed vejens levetid?*
- *Hvordan påvirker implementeringen af geonet vejens anlægsomkostninger og udledning af CO_2e?*

Der kan ud fra specialets litteraturstudie og forsøgsresultater konkluderes, at der er potentiale for at reducere lagtykkelsen af det ubundne bærelag, stabilt grus, i vejopbygninger på blød bund. Reduceringen sker på grund af en bæreevneforøgelse på 28-58% i det ubundne bærelag, stabilt grus, ved implementeringen af geonet. Forsøgsresultaterne beskriver en mulig reduktion på 80 mm ved en underbund på 1,4 MPa og 60 mm ved en underbund på 7,5 MPa. Styrkeforøgelsen ved indlæggelse af geonet viser et potentiale for en endnu større reduktion, men grundet en erfaret nødvendig lagtykkelse på 200 mm oven på geonettet, er det ikke muligt at reducere lagtykkelsen yderligere. Reduktionen giver anledning til besparelse af presset råstoffer såsom sten, grus og sand.

Specialets forsøgsresultater fra cyklisk pladebelastning giver en armeringseffekt på omkring 4 ved indlæggelse af geonet, og ifølge litteraturstudiet beskriver de videnskabelige artikler et armeringseffekt på omkring 6-8. Resultaterne beviser, at der sker en styrkeforøgelse ved indlæggelse af geonet og dermed opstår et potentiale for at reducere lagtykkelsen af det ubundne bærelag uden at gå på kompromis med vejens bæreevne og dermed levetid. Det triaksiale geonet forøger stivheden af det ubundne bærelag mere end det biaksiale geonet, hvilket betyder, at den triaksiale maskestruktur opnår en større optagelse af spændinger og tøjninger end den biaksiale maskestruktur.

Forsøgsresultaterne fra statisk pladebelastning har resulteret i E-moduler for de forskellige forsøgsopstillinger. E-modulerne er anvendt til at opstille en lineær sammenhæng. Denne sammenhæng har givet en forøgelse i styrken af E-modulet for hele opbygningen pr. mm stabilt grus oven på geonettet. For underbunden på 1,4 MPa viser den lineære sammenhæng en styrkeforøgelse i uarmeret tilstand på 0,05 MPa pr. mm stabilt grus, med biaksial geonet 0,07 MPa og med triaksial geonet 0,08 MPa. For underbunden på 7,5 MPa opnås en forbedring af E-modulet i uarmeret tilstand på 0,07 MPa pr. mm stabilt grus, med biaksial geonet 0,08 MPa og med triaksial geonet 0,09 MPa. Der skal minimum indlægges 200 mm stabilt grus oven på geonettet. Derved kan specialets opstillede lineære tendenslinjer, med en vis usikkerhed, benyttes til at beregne besparelsen i det ubundne bærelag, stabilt grus, når der skal udføres vejanlæg på blød bund på 1,4 MPa eller 7,5 MPa.

Konklusionen omkring, at geonet i vejopbygningen giver anledning til reducering af det ubundne bærelag gør det interessant at undersøge, om det er gunstigt at anvende i forhold økonomi og CO_2e.

Ved betragtning af anlægsøkonomiske, er det kun fordelagtigt at indlægge geonet, når der anvendes det biaksiale geonet på en underbund af 1,4 MPa. Det triaksiale geonet er dyrere at anvende til trods for en besparelse ved indlæggelse af geonet i en reduceret lagtykkelse med henholdsvis 60 mm og 80 mm. Beregningerne viser en prisforøgelse på 3-16%. Hvis der beregnes på udledningen af CO_2e i forhold til produktion, indbygning og transport af materialer er der for en underbund på 1,4 MPa og underbund på 7,5 MPa med det triaksiale geonet potentiale for en reduktion i udledningen af CO_2e på 11-17%. Det biaksiale geonet på en underbund på 7,5 MPa forøger udledningen af CO_2e med 0,2%. Reduceringerne og den mindre forøgelse vil ændre sig afhængigt af stabilt grus mængden og transportafstanden, hvorfor dette altid bør medtages i betragtningen.

Transport af materialerne er ikke kun anlægsøkonomisk tungere, men øger også andelen af udledte CO_2e. Råstofindvinding er stigende i Danmark og forventes at stige yderligere i takt med regeringens Infrastrukturplan skal realiseres. Udfordringen er, at flere grusgrave nærmer sig en udtømning, hvilket øger transportafstanden af råstoffer, såsom sten, grus og sand. Dette giver anledningen til at undersøge muligheden for at spare og anvende råstoffer med omtanke. Derfor har dette speciale undersøgt og bevist, at der kan spares på råstofferne til stabilt grus, når der indlægges geonet i vejopbygningens ubundne bærelag. Ligeledes er det bevist, at det ikke nødvendigvis er en økonomisk meromkostning og udledningen af CO_2e kan reduceres ved indlæggelse af geonet på blød bund.

13.1 Perspektivering

Specialets resultater har betydning for fremadrettet dimensionering med geonet, hvor der udføres vejanlæg på blød bund med styrker på 1,4 og 7,5 MPa, eftersom forsøgsresultater og databehandling har vist en positiv effekt ved indlæggelse af geonet. Ligeledes kan specialets lineære tendenslinjer anvendes til at estimere den forventede styrke af det ubundet bærelag ved indlæggelse af geonet.

En alternativ mulighed er at anvende geonet og stabilt grus til et modificeret planum, hvilket betyder at anlægge et lag af stabilt grus og geonet oven på planum, hvorefter vejen dimensioneres på traditionel vis. Dette resulterer i et højere E-modul af planum, hvilket gør det interessant at undersøge mulighederne for at anvende specialets resultater hertil.

Branchen oplever udfordring ved valg af geonet, hvortil der har været en formodning, at strukturen i det triaksiale geonet er bedre til at optage spændingerne og tøjningerne end det biaksiale geonet. Der er i dette speciale bevist, at der opnås en større styrkeforøgelse med det triaksiale geonet, hvorfor denne formodning er blevet bekræftet.

Det er i beskrevet, at branchen oplever det som en udfordring, at geonet ikke er veldokumenteret og ikke dokumentere dets virkningsgrad, hvormed der ikke kan garanters en bestemt besparelse. Branchen viser sig derfor fra en konservativ side, hvor der foretrækkes veldokumenterede metoder. Dette speciale bidrager til at bekræfte Byggros designdiagrammer, som er dem branchen har mulighed for at tage udgangspunkt i. De økonomiske beregninger bekræfter branchens skepsis, da størstedelen af de økonomiske beregninger viser en besparelse af stabilt grus, som ikke opvejer den ekstraudgift der vil være ved indlæggelse af geonet. Her er det der ikke medregnet, at det vil være en yderligere besparelse, når der skal komprimeres en mindre lagtykkelse stabilt grus. Samtidig kan det være relevant at undersøge priselasticiteten på geonet og transportafstanden af stabilt grus, som har vist sig at være udslagsgivende for beregningerne. Det vil derfor være relevant igen at vurdere de økonomiske beregninger, når eller hvis prisen på geonet eller transportafstanden

ændrer sig. Samtidig viser CO_2e beregninger en reduktion, særligt for det triaksiale geonet, og da Vejdirektoratet udtaler, at CO_2e begynder at betyde mere for anlægsprojekter, så bør der branchen overveje muligheden for at anvende geonet ved nye vejanlæg på blød bund.

Forsøgsresultaterne fra specialet kan bidrage til at øge branchens viden omkring styrkeforøgelse ved geonet indlagt i det ubundne bærelag, stabilt grus. Ligeledes bekræftes specialets resultater af Byggros designdiagrammer til reducering af det ubundne bærelag.

Fremadrettet kan det være relevant at udføre endnu flere forsøg på underbunde med samme styrke som er undersøgt i dette speciale, for at få en gennemsnitlig styrkeforøgelse samt flere datapunkter til at bekræfte en lineær sammenhæng ved indlæggelse af geonet. Ligeledes kan effekten af geonet undersøges på andre styrker af underbunde. Der kan med fordel undersøges indvirkningen af geonet på blød bund med styrken fra 5-40 MPa. Herved kan der opstilles sammenhænge mellem styrkeforøgelse og underbund på flere forskellige styrker blød bund. Yderligere kan det være relevant at udføre forsøg i felten med virkelige blødbundsforhold. Det vil være relevant at undersøge forskelle og usikkerheder mellem laboratorie- og feltforsøg.

Litteratur

Abu-Farsakh og Chen, 2011. Murad Y. Abu-Farsakh og Qiming Chen. *Evaluation of geogrid base reinforcement in flexible pavement using cyclic plate load testing. International journal of pavement engineering, 12(3), 275–288, 2011. ISSN 1029-8436.*

Ad hoc-gruppe Vejregelgruppe Dimensionering, 2022. Ad hoc-gruppe Vejregelgruppe Dimensionering. *Dimensionering - Befæstelser og forstærkningsbelægninger, 2022. Vejdirektoratet.*

Baltzer, 2005. Susanne Baltzer. *Ikke publiceret internt notat fra Vejdirektoratet. Vejdirektoratet, 2005.*

BG Byggros A/S, 2023. BG Byggros A/S. *Geoarmering og stabilisering. https://www.byggros.com/produkter/anlaegsteknik/geonet, 2023.*

Bjerring, 2023. Dan Bjerring. *NCC advarer mod mangel på råstoffer. https://bygtek.dk/artikel/byggeri/ncc-advarer-mod-mangel-p-rstoffer, 2023.*

Bolet og Busch, 2016. Lars Bolet og Christian Busch. *Vejbefæstelsers dimensionering. Department of Civil Engineerng, Aalborg University, 2016. DCE Lecture notes No. 52.*

Brinkmann og Tanggaard, 2020. Svend Brinkmann og Lene Tanggaard. *Kvalitative metoder - En grundbog. ISBN: 9788741277264, s. 33-63. Hans Reitzels Forlag, 3. edition, 2020.*

Brodersen og Nielsen, 2011. René Brodersen og Rasmus Beck Nielsen. *Styrkemæssige og økonomiske konsekvenser ved brug af geonet i vejkonstruktioner. Aalborg Universitet, 2011.*

Danmarks Statistik, 2023. Danmarks Statistik. *Statistikbanken. https://www.statistikbanken.dk/, 2023.*

Dansk Geoteknisk Forenings Feltkomité, 2005. Dansk Geoteknisk Forenings Feltkomité. *Referenceblad for statiske pladebelastningsforsøg, 2005.*

Dansk Standard, 2003. Dansk Standard. *Vejmaterialer - Ubundne og hydraulisk bundne blandinger - Del 5: Prøvningsmetoder til laberatiriebestemmelse af referencedensitet og vandindold - Vibrationsborg, 2003. 13286-5.*

Evolution, 2023. Evolution. *Evolution Hulk Electro 230V. https://shop.evolutionpowertools.com/products/hulk_electro#specifications, 2023.*

Finansministeriet, 2021. Finansministeriet. *Aftale mellem regeringen (Socialdemokratiet), Venstre, Dansk Folkeparti, Socialistisk Folkeparti, Radikale Venstre, Enhedslisten, Det Konservative Folkeparti, Nye Borgerlige, Liberal Alliance, Alternativet og Kristendemokraterne om: Infrastrukturplan 2035. https://www.trm.dk/media/rt1h51td/endelig-aftaletekst-infrastrukturplan-2035-final-a.pdf, 2021.*

Folketinget, 2021. Folketinget. *Infrastrukturplan 2035. Folketing, Christiansborg, 2021.*

Huntington og Ksaibati, 2000. G. Huntington og K. Ksaibati. *Evaluation of geogrid-reinforced granular base. International journal of pavement engineering, 18(1), 22–26, 28, 2000. ISSN 0882-4983.*

Jackon, 2023. Jackon. *JACKOPOR® PLADER, 2023.*

Klima-, Energi- og Forsningsministeriet, 2023. Klima-, Energi- og Forsningsministeriet. *Dansk klimapolitik. https://ens.dk/ansvarsomraader/energi-klimapolitik/fakta-om-dansk-energi-klimapolitik/dansk-klimapolitik, 2023.*

Miljøstyrelsen, 2022. Miljøstyrelsen. *Råstoffer. https://mst.dk/erhverv/raastoffer/, 2022.*

Nielsen, 2015. Bo Gerner Nielsen. *Referer korrekt: om udarbejdelse af bibliografiske referencer. https://static-curis.ku.dk/portal/files/189762563/Refer_r_korrekt_16_02_2018.pdf, 2015.*

Nordjyske, 2022. Nordjyske. *Region vil spare på sand og grus der risikerer at slippe op. https://nordjyske.dk/nyheder/danmark/region-vil-spare-paa-sand-og-grus-der-risikerer-at-slippe-op/3472614, 2022. Besøgt: 18-05-2023.*

Ovesen et al., 2017. Niels Krebs Ovesen, Leif Fuglsang, Gunnar Baggae og Anette Krogsbøll. *Lærebog i geoteknik. Polyteknisk Forlag, Lyngby, 2017.*

Qian et al., 2013. Yu Qian, Jie Han, Sanat K. Pokharel og Robert L. Parsons. *Performance of Triangular Aperture Geogrid-Reinforced Base Courses over Weak Subgrade under Cyclic Loading. Journal of materials in civil engineering., 25(8), 1013–1021, 2013.*

Smith og Andersen, 2020. Katrine Hauge Smith og Sarah Cecilie Andersen. *Fremtidens byggematerialer - Har vi mangel på råstoffer? Teknologisk Institut, Taastrup, 2020.*

Statens Vegvesen, 2011. Statens Vegvesen. *Håndbok 018 Vegbygging, 2011.*

Statens Vegvesen, 2022a. Statens Vegvesen. *Vegnormal N200 Vegbygging, 2022a.*

Statens Vegvesen, 2022b. Statens Vegvesen. *Håndbok V220 Geoteknik i Vegbygging, 2022b.*

Sun et al., 2015. Xiaohui Sun, Jie Han, Jayhyun Kwon, Robert L. Parsons og Mark H. Wayne. *Radial stresses and resilient deformations of geogrid-stabilized unpaved roads under cyclic plate loading tests. Geotextiles and Geomembranes, 43(5), 440–449, 2015. ISSN 0266-1144. doi: https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2015.04.018. URL https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266114415000564. Special issue on Geosynthetics for Transportation Applications.*

Sun et al., 2018. Xiaohui Sun, Jie Han, Robert L. Parsons og Jitendra Thakur. *Equivalent California Bearing Ratios of Multiaxial Geogrid-Stabilized Aggregates over Weak Subgrade. Journal of Materials in Civil Engineering, 30(11), 04018284, 2018. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002487. URL https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0002487.*

Tensar International Corparation, 2023. Tensar International Corparation. *Tensar: Geogrids, Engineering Products and Solutions. https://www.tensar.co.uk, 2023.*

UNDP's nordiske kontor, 2023. UNDP's nordiske kontor. *FN's verdensmål for bæresdygtig udvikling. https://www.verdensmaalene.dk/, 2023.*

U.S. Department of Transportation, 2008. U.S. Department of Transportation. *Geosynthetic design and construction guidelines, 2008.*

U.S. Department of Transportation, 2021. U.S. Department of Transportation. *Airport Pavement Design and Evaluation, 2021.*

U.S. Department of Transportation, 2018. U.S. Department of Transportation. *Standard Specifications for Construction of Airports, 2018.*

Vanggaard og Baltzer, 2003. Morten Vanggaard og Susanne Baltzer. *Bæreevneforøgelse ved brug af geonet? Vejforum, 2003.*

Vejdirektoratet, 2023. Vejdirektoratet. *Velkommen til InfraLCA. https://www.vejdirektoratet.dk/infralca, 2023. Besøgt: 18-05-2023.*

Vejregelgruppen jord, grus og brolægning, 2018. Vejregelgruppen jord, grus og brolægning. *Jordarbejder - Vejl., 2018. Vejdirektoratet.*

Vestergaard et al., 2021. Christoffer Christian Rønde Vestergaard, Gustav Brandt-Pedersen, Jacob Weinreich Sørensen, Mark Lund Andersen og Rasmus Augustesen Nielsen. *Fundering af udvidelsen af Tranholmvej. Aalborg Universitet, 2021.*

Visser et al., 2017. Rien Visser, Kristopher Brown og Blair Tinnelly. *Geogrid for unsealed forest roads: installation considerations and bearing capacity testing in New Zealand. International journal of forest engineering, 28(2), 106–115, 2017. ISSN 1494-2119.*

Woon-Hyung et al., 2006. Kim Woon-Hyung, Tuncer B. Edil, Craig H. Benson og Burak F. Tanyu. *Deflection of Prototype Geosynthetic-Reinforced Working Platforms over Soft Subgrade. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1(1975), 2006.*

Zikmund Rakowski, 2017. PhD Zikmund Rakowski. *An Attempt of the Synthesis of Recent Knowledge About Mechanisms Involved in Stabilization Function of Geogrids in Infrastructure Constructions. Procedia engineering., 189, 166–173, 2017. ISSN 1877-7058.*

A Dokumentation af stabilt grus

Nysum Grusgrav
Nysumgårdsvej
9610 Nørager
Tlf: 98 56 91 41
Fax: 98 56 92 41

COLAS

Stabiltgrusanalyse

LABORATORIUM
Tlf: 89 26 46 11

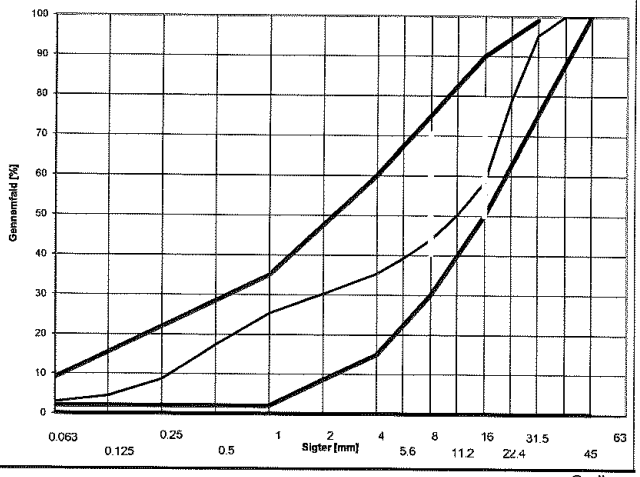
Udskrevet: 28-02-2023

Betegnelse: Stabilgrus SG II | Råvaretype: S | Råvare nr: 2003224
Fraktion: | Leverandør: Nysum Grusgrav | Gældende fra: 10-01-2023
Analyse nr: 28722 | Udtaget dato: 21-02-2023 | Modt.dato: 28-02-2023 | Signeret: MST
Laboratorium: VI | Prøveleverandør: Grusgrav

Materialedata:	Resultat	Spec.	Nedre tol.	Nedre ac.	Øvre ac.	Øvre tol.	Analysemetode
Humus, %							
Knust Ctr			0			70	DS/EN 933-5
Tørdensitet,Mg/m^3		2,16					DS/EN 13286-5
MB	2,3		0	0	3	3	DS/EN 933-9
Opt. Vand, %		6					DS/EN 13286-5

Gennemfald %

Sigte mm	Resultat	Spec.	Min.	Max.
63	100	100	100	
45	100	100		
31,5	95	99	75	99
22,4	78	87		
16	58	72	50	90
11,2	50	61		
8	44	51	30	75
5,6	39	45		
4	35	39	15	60
2	30	34		
1	25	29	2	35
0,5	17	20		
0,25	9	10		
0,125	4	5		
0,063	2,9	2,8	2,0	9,0

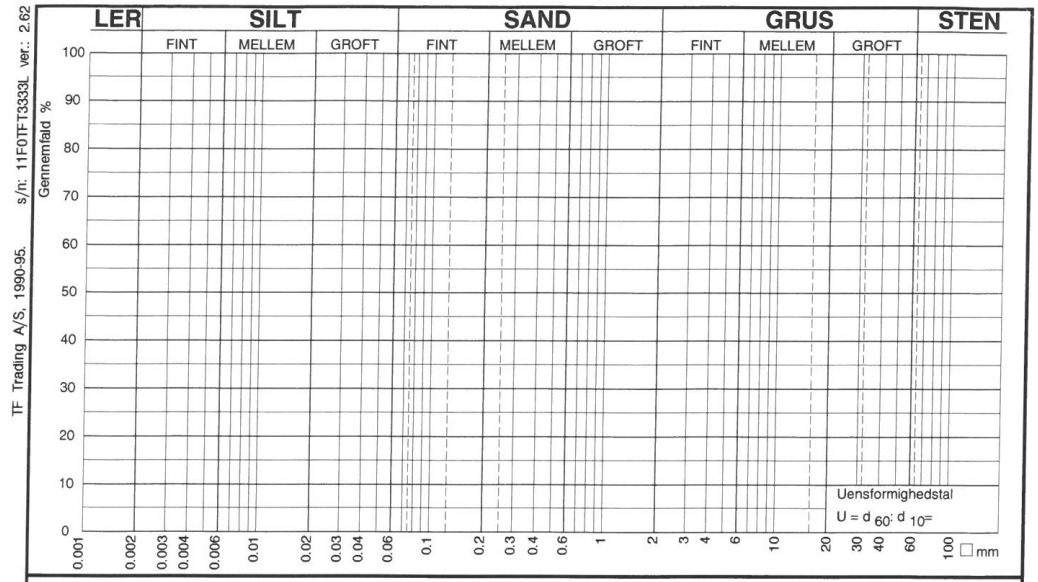


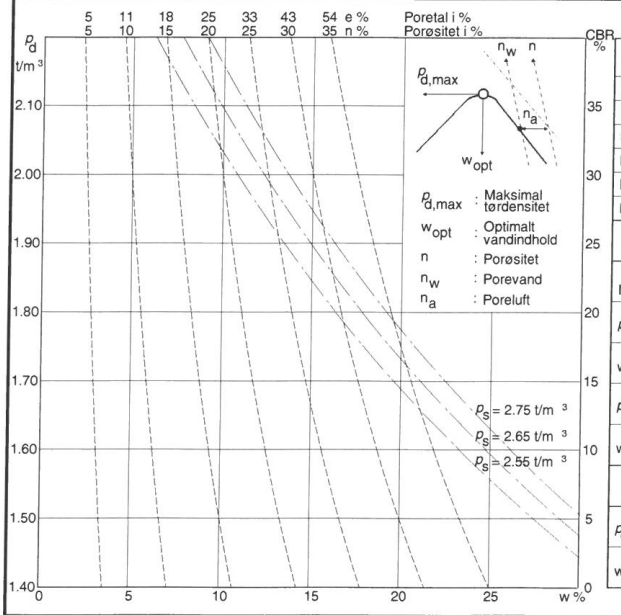
Analysemetode: DS/EN 933-1
Bemærkning: 23009

Godk:
CT

OK

1/3 - 23





Signaturer

Form	10 cm	15 cm
Forsøg	Komprimering	CBR
Standard	○	△ □
Modificeret	●	▲ ■
Mætningslinie		m. vandl.
Hjælpelinie		▽ ▼

Proctorforsøg

Indstampning	Standard	Modificeret
$p_{d,max}$ t/m³		
w_{opt} %		
$p_{d,max}$ korr. t/m³		
w_{opt} korr. %		

Vibrationsforsøg

$p_{d,max}$	t/m³	2.11
w_{opt}	%	7.4

Gennemfald 0,075 mm		%	Frasigtet > 16 mm	s	%	Frasigtet > 75 mm		%
Flydegrænse	w_L	%	Plasticitetsgrænse	w_P	%	Plasticitetsindeks	I_P	%
Korndensitet (0 - 0,075 mm)	p_s	t/m³	Korndensitet (0-16 mm)	p_s	t/m³	Korndensitet (> 16 mm)	p_s	t/m³
Kalkindhold (0 - 1 mm)	ka	%	Kalkindhold (0-16 mm)	ka	%	Kalkindhold (> 16 mm)	ka	%
Glødetab	gl	%	Glødetab reduceret	gl_{red}	%	Humusindhold		
Sandækvivalent	SE	%	Kapillaritet	h_c	cm			
Vurderet frostfare			Vandindhold in situ	w_{nat}	%			

FORSØGSOVERSIGT

Prøvebeskrivelse: Stabilgrus

Rekvirent: SEJLSTRUP ENTREPRENØRF.		SEJLSTRUP VEJLABORATORIUM	Station: Boring:	Mrk.:	
Sted: Loftbrovej Nørresundby			Dybde: Kote:	Lab.nr.: 1058	
Udt.d.: 17/02-2023	Modt.d.: 21/02-2023	Tegn.:	Godk.:	Sag nr.: 9991881058	Bilag/side nr.:

B Komprimeringskontrol

I forbindelse med udførelse af forsøg er der udført komprimeringskontrol og derved fundet komprimeringsgraden af stabilt grus. Komprimeringsgraden er beregnet ved rumfang af stabilt grus og vægten af hver sæk med stabilt grus før og efter brug til opfyldning i forsøgsopbygningen. Tørdensiteten ved vibrationsforsøg, jf. appendiks A, er fundet til $\rho_{d,max}$=2,11 og et optimalt vandindhold på w_{opt}=7,4%. Vandindholdet er ikke kontrolleret ved levering og indbygning, hvorfor det ikke med sikkerhed kan garanteres, at stabilt grus er vibreret under de mest optimale forhold. Tilmed kan den præcise højde af opbygningerne variere og der kan være sket spild af materiale, siden stabilt grus er genbrugt til de efterfølgende forsøgsopbygninger, og der har været små revner i siden af pladerne af ekspanderet polystyren, hvor sand og grusfraktioner kan være faldet ned. Vægt, rumfang og densitet er vist for de forskellige lagtykkelser i tabel B.1.

Tabel B.1: Vægt, rumfang og den dertilhørende densitet af de forskellige lagtykkelser af stabilt grus efter vibrering.

240 mm	
Vægt [ton]	1,18
Rumfang [m^3]	0,58
Densitet [ton/m^3]	2,05
290 mm	
Vægt [ton]	1,48
Rumfang [m^3]	0,70
Densitet [ton/m^3]	2,13
340 mm	
Vægt [ton]	1,77
Rumfang [m^3]	0,82
Densitet [ton/m^3]	2,17

Alle forsøgsopbygninger er vibreret med pladevibrator 10 gange for hver 120 mm stabilt grus, hvorfor opbygningen med 240 mm er vibreret med pladevibrator ad to omgange og opbygningerne med 290 og 340 mm er vibreret ad tre omgange. Alle opbygningerne med 240 mm stabilt grus er udført først, hvorefter der er afvejet og udført forsøg på forsøgsopbygningerne til 290 mm og til sidst den samme fremgangsmåde for 340 mm. Fremgangsmåden er valgt, fordi stabilt grus ikke skal afvejes for hver forsøgsopbygning, men kan tages op og anlægges på ny, efter hele forsøgsopbygningen har været tømt og EPS-pladerne kontrolleret for deformation og eventuelt udskiftet.

C Statisk pladebelastning

Der er i dette appendiks opstillet en forsøgsrækkefølgen og alle resultaterne fra de statiske pladebelastningsforsøg, som er afbildet grafisk. Ligeledes fremgår der for hver graf med statisk pladebelastning et beregnet E-modul, hvilket er gjort jf. metoden i afsnit 2.5.2.

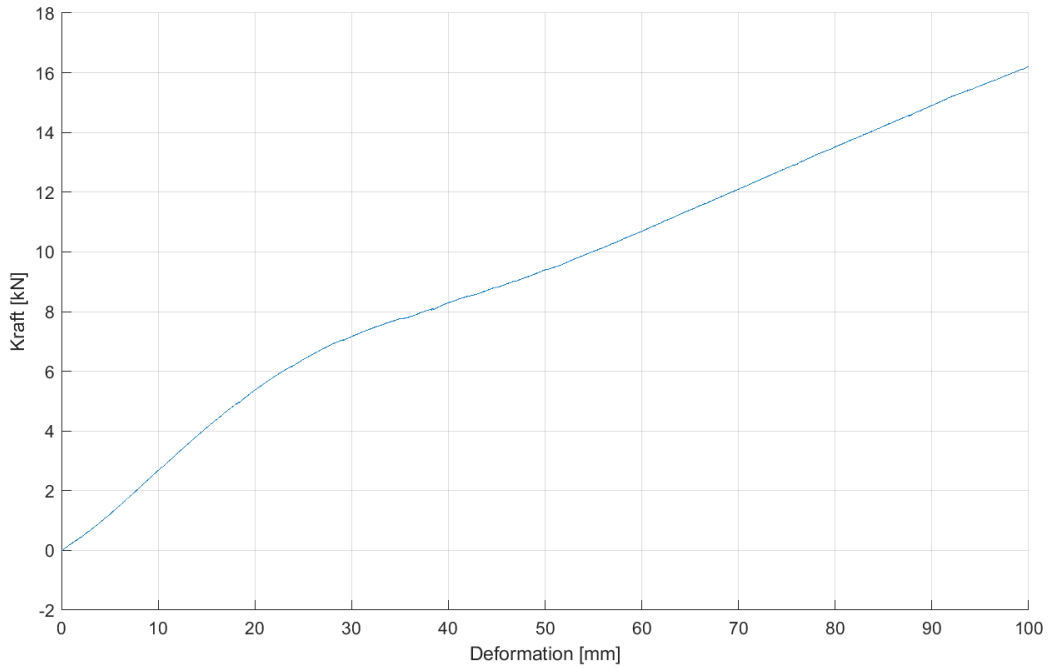
C.1 Forsøgsoversigt

Af tabel C.1 fremgår, hvilke forsøg, der er endeligt anvendt, og i hvilke der er observeret fejl. Fejl i total deformation skyldes forsøg, hvor der ikke har kunne udføres en deformation til 100 mm, hvilket har skyldes en for kort cylinder. Aktuatorfejl skyldes, at der har været fejl i belastningen, hvorfor maskinen efterfølgende er genstartet. Fejl i opbygningen skyldes et målt lavt E-modul sammenlignet med tilsvarende forsøg, hvorfor dette forsøg er gentaget.

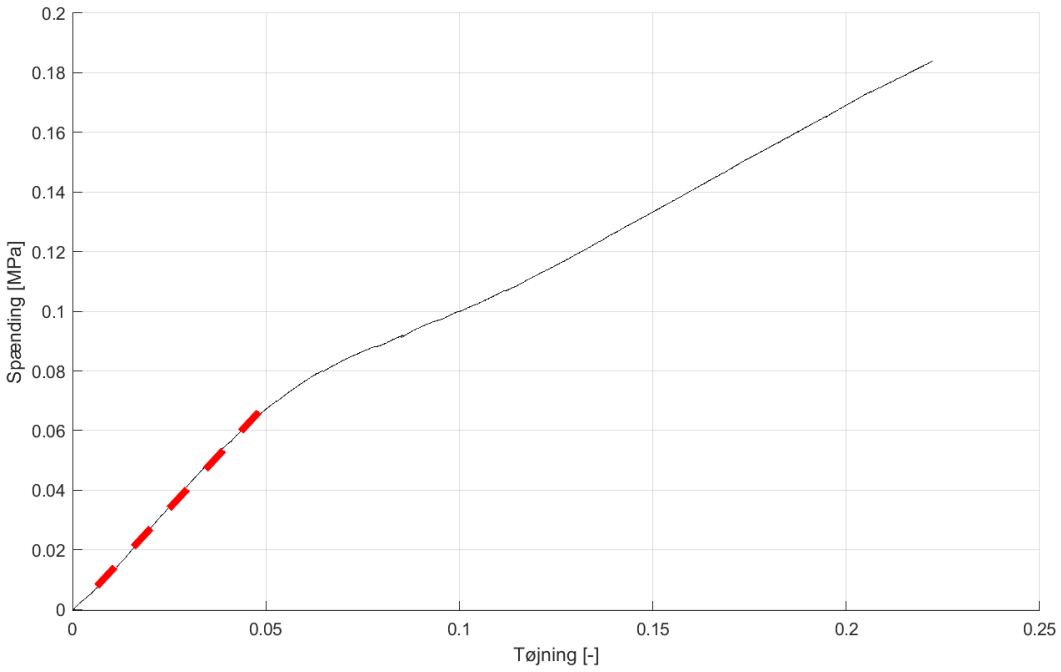
Tabel C.1: Rækkefølgen og antal udførte forsøg med statisk pladebelastning.

Statisk pladebelastning		
Test 1	EPS 60	Fejl i total deformation
Test 2	EPS 60	Aktuatorfejl
Test 3	EPS 250	Fejl i total deformation
Test 4	EPS 60	Anvendt
Test 5	EPS 250	Aktuatorfejl
Test 6	EPS 60	Fejl i total deformation
Test 7	EPS 250	Fejl i total deformation
Test 8	EPS 250	Fejl i total deformation
Test 9	Biaksial EPS 250	Anvendt
Test 10	EPS 250	Fejl i total deformation
Test 11	EPS 250	Anvendt
Test 12	Triaksial EPS 250	Anvendt
Test 13	Biaksial EPS 60	Anvendt
Test 14	Triaksial EPS 60	Aktuatorfejl
Test 15	Triaksial EPS 60	Fejl i opbygningen
Test 16	Triaksial EPS 60	Anvendt
Test 17	Kontrol 2 EPS 60	Aktuatorfejl
Test 18	Triaksial EPS 60 100 mm	Anvendt
Test 19	Kontrol 2 EPS 60	Anvendt
Test 20	Kontrol 2 EPS 250	Anvendt
Test 21	Kontrol 3 EPS 60	Anvendt
Test 22	Kontrol 3 EPS 250	Anvendt

C.2 EPS 60 - Forsøg på ren underbund

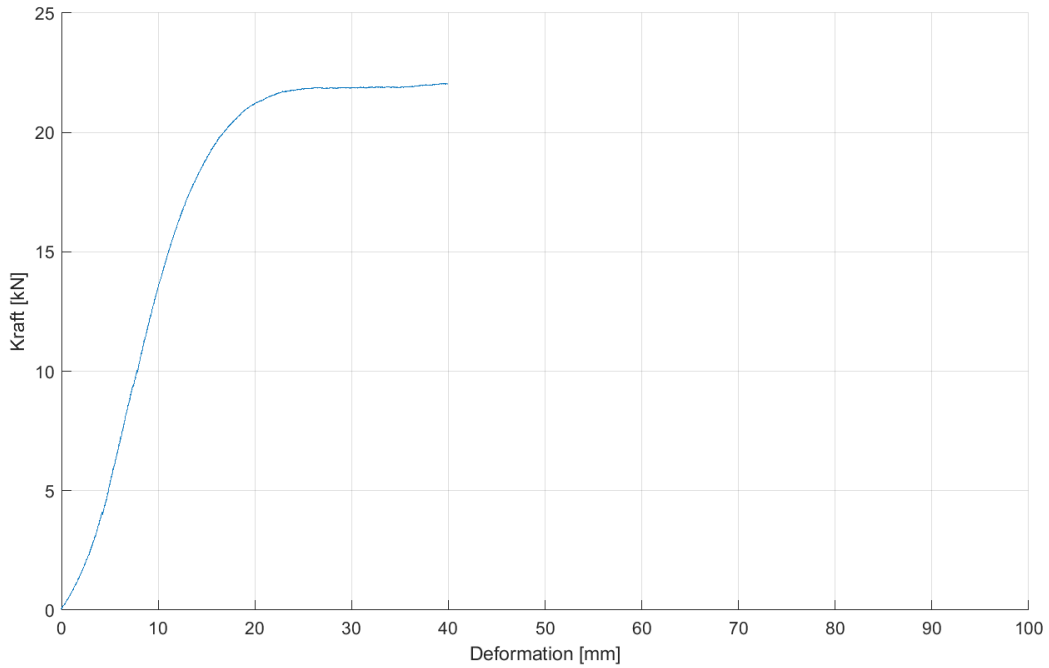


Figur C.1: Kraft som funktion af deformation på underbunden EPS 60.

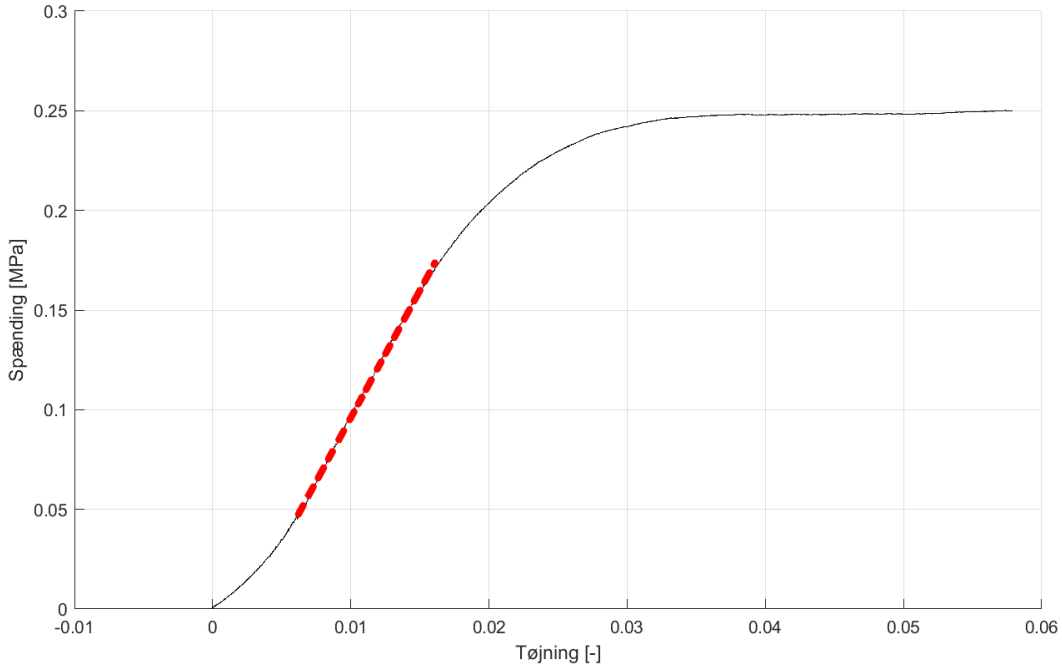


Figur C.2: Spænding som funktion af tøjning på underbunden EPS 60. E-modulet måles langs den stiplede linje til 1,40 MPa.

C.3 EPS 60 - Kontrolforsøg 1 på stabilt grus

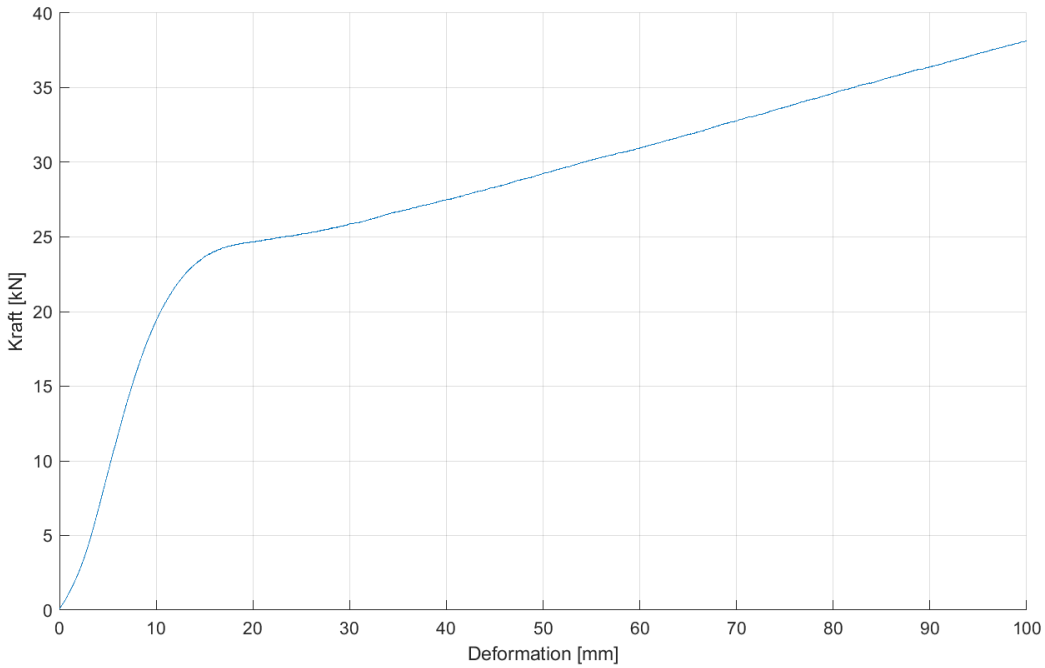


Figur C.3: Kraft som funktion af deformation på underbunden EPS 60 med 240 mm stabilt grus uden geonet.

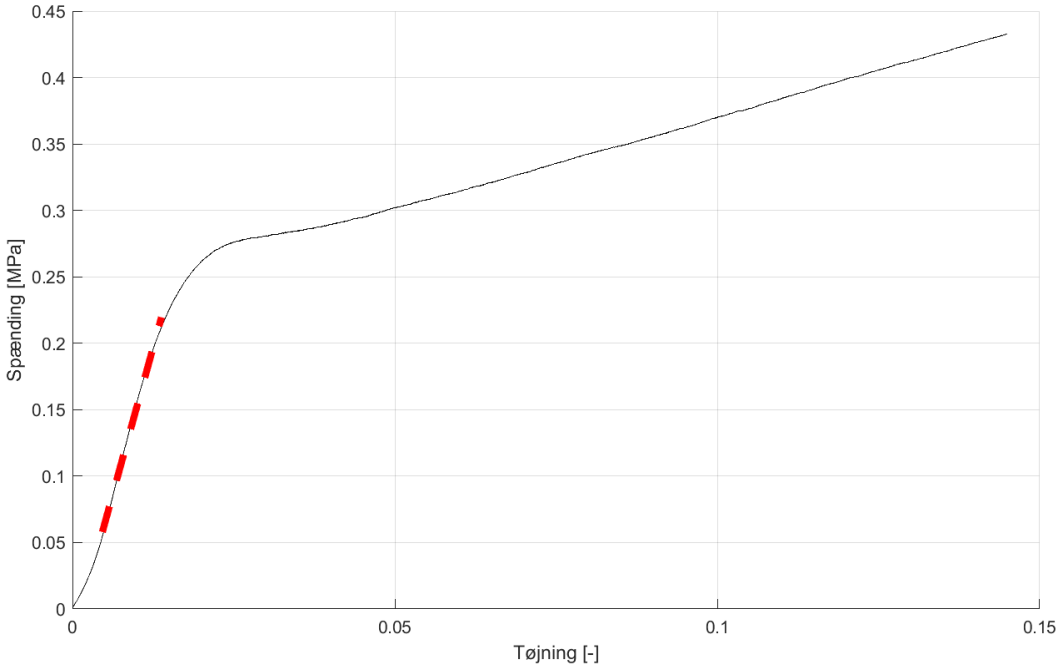


Figur C.4: Spænding som funktion af tøjning på underbunden EPS 60 med 240 mm stabilt grus uden geonet. E-modulet måles langs den stiplede linje til 12,8 MPa.

C.4 EPS 60 - Forsøg på biaksial geonet og stabilt grus

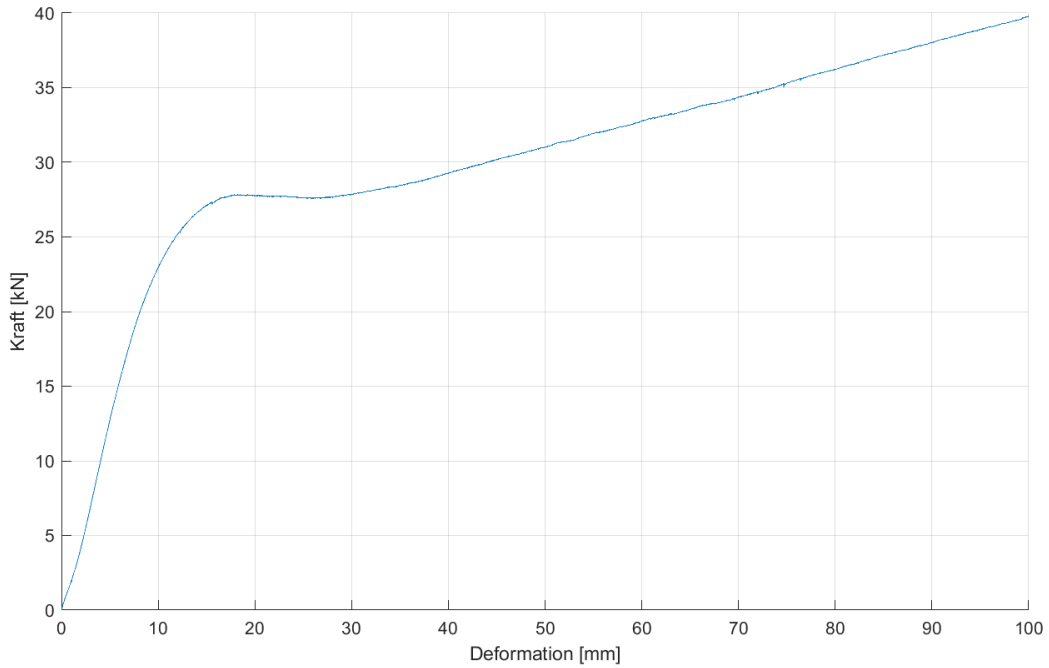


Figur C.5: Kraft som funktion af deformation på underbunden EPS 60 med biaksial geonet og i alt 240 mm stabilt grus.

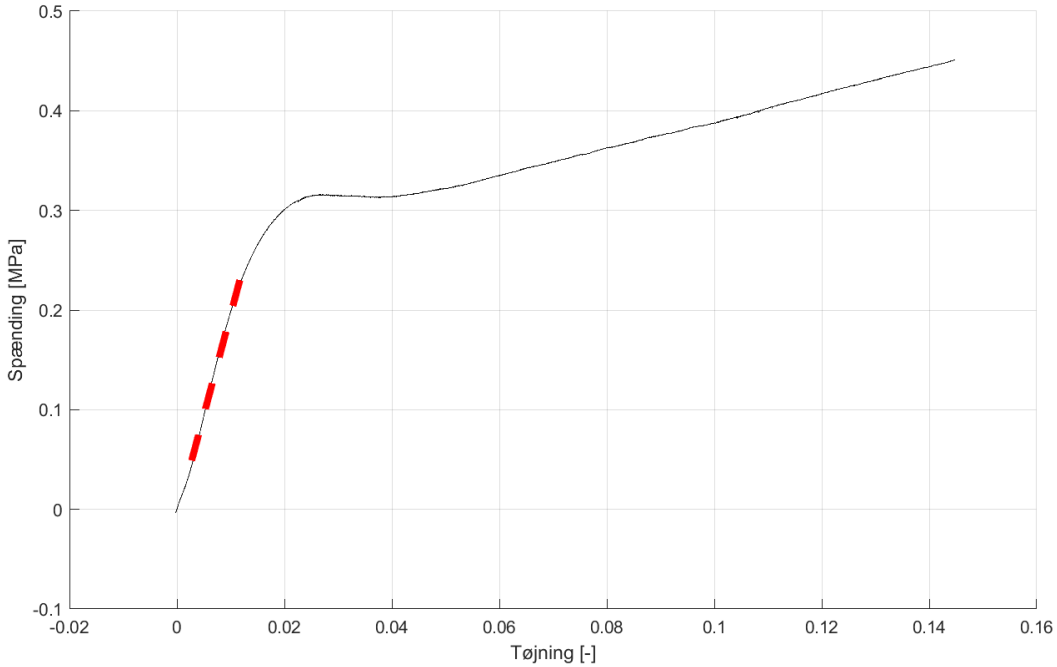


Figur C.6: Spænding som funktion af tøjning på underbunden EPS 60 med med biaksial geonet og i alt 240 mm stabilt grus. E-modulet måles langs den stiplede linje til 17,6 MPa.

C.5 EPS 60 - Forsøg på triaksial geonet og stabilt grus

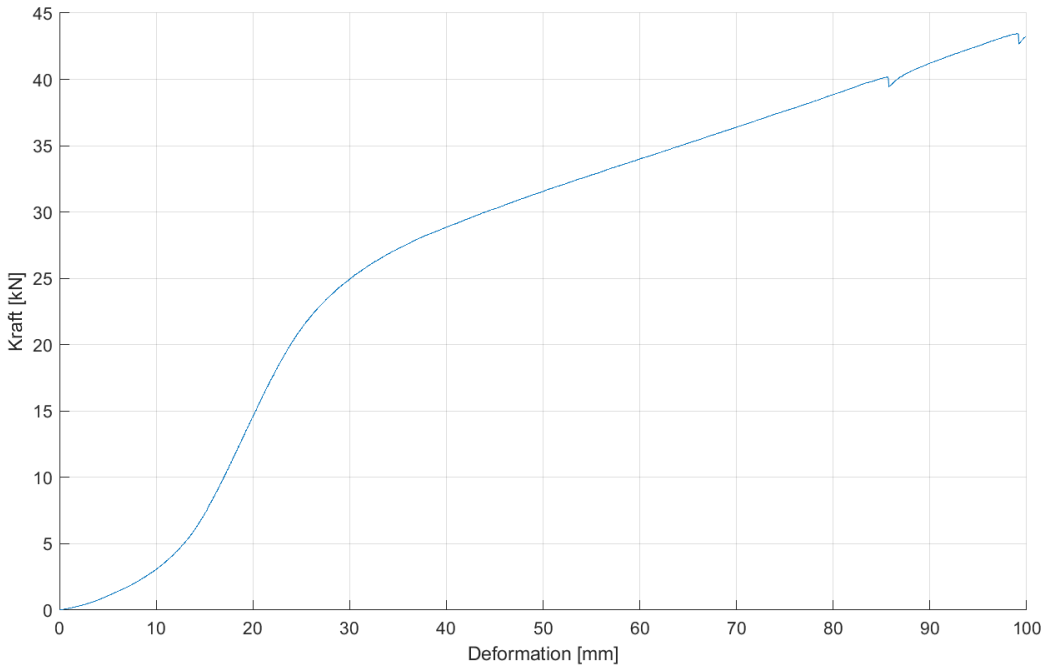


Figur C.7: Kraft som funktion af deformation på underbunden EPS 60 med triaksial geonet og i alt 240 mm stabilt grus.

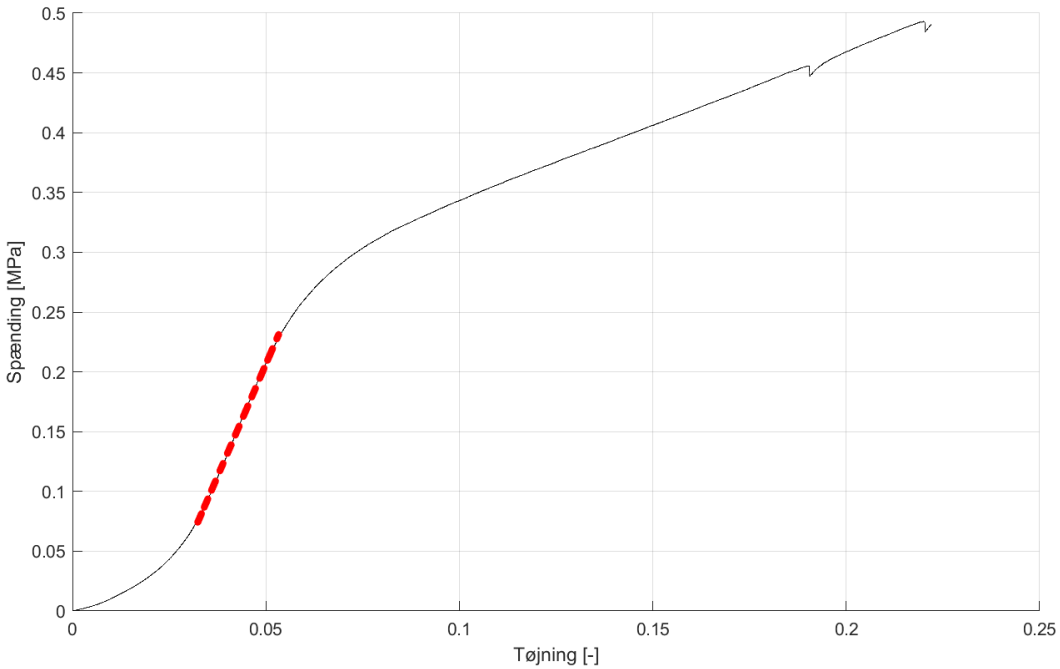


Figur C.8: Spænding som funktion af tøjning på underbunden EPS 60 med med triaksial geonet og i alt 240 mm stabilt grus. E-modulet måles langs den stiplede linje til 20,2 MPa.

C.6 EPS 250 - Forsøg på ren underbund

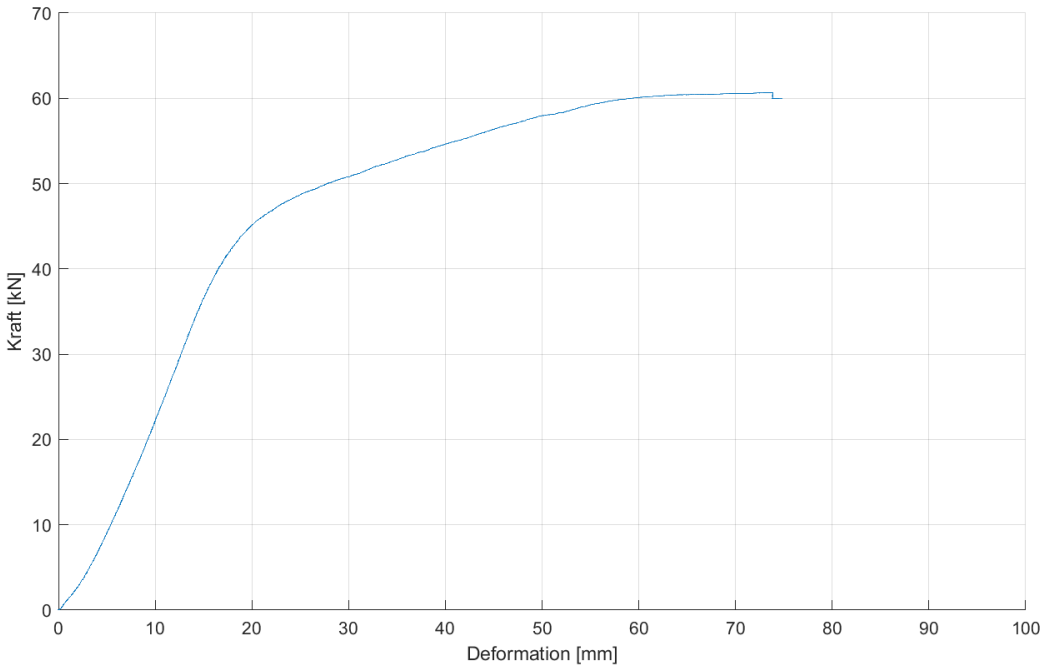


Figur C.9: Kraft som funktion af deformation på underbunden EPS 250.

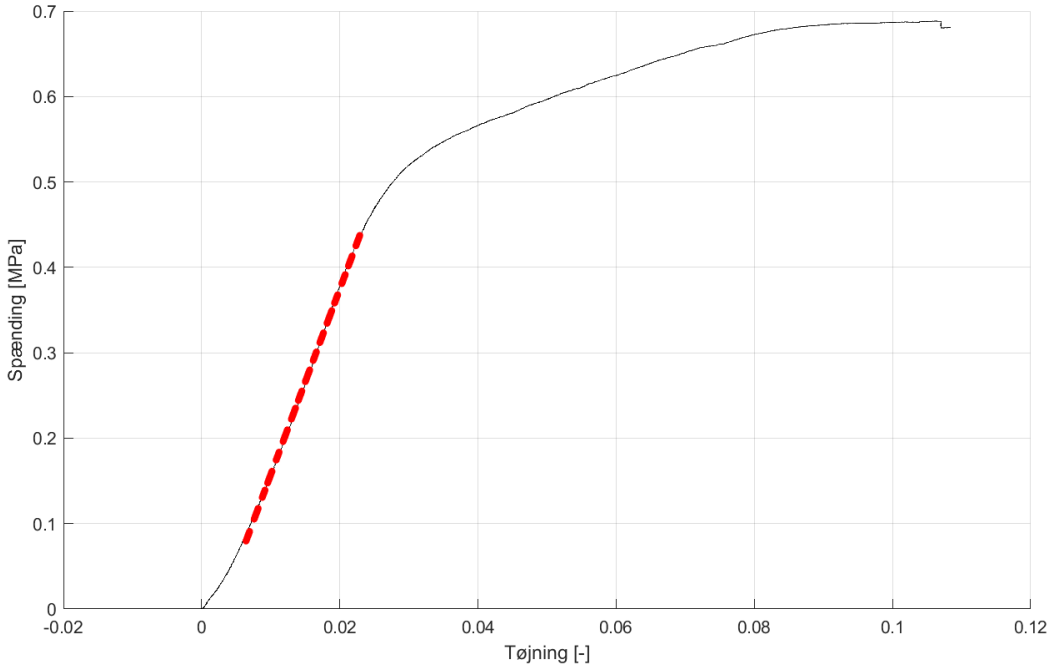


Figur C.10: Spænding som funktion af tøjning på underbunden EPS 250. E-modulet måles langs den stiplede linje til 7,51 MPa.

C.7 EPS 250 - Kontrolforsøg 1 på stabilt grus

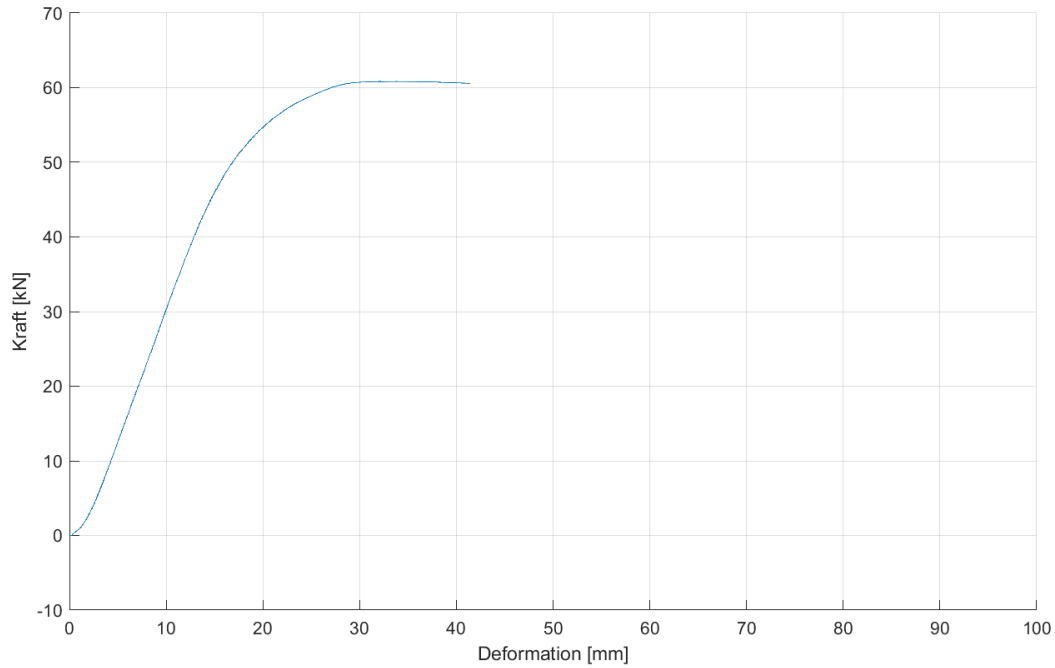


Figur C.11: Kraft som funktion af deformation på underbunden EPS 250 med 240 mm stabilt grus uden geonet.

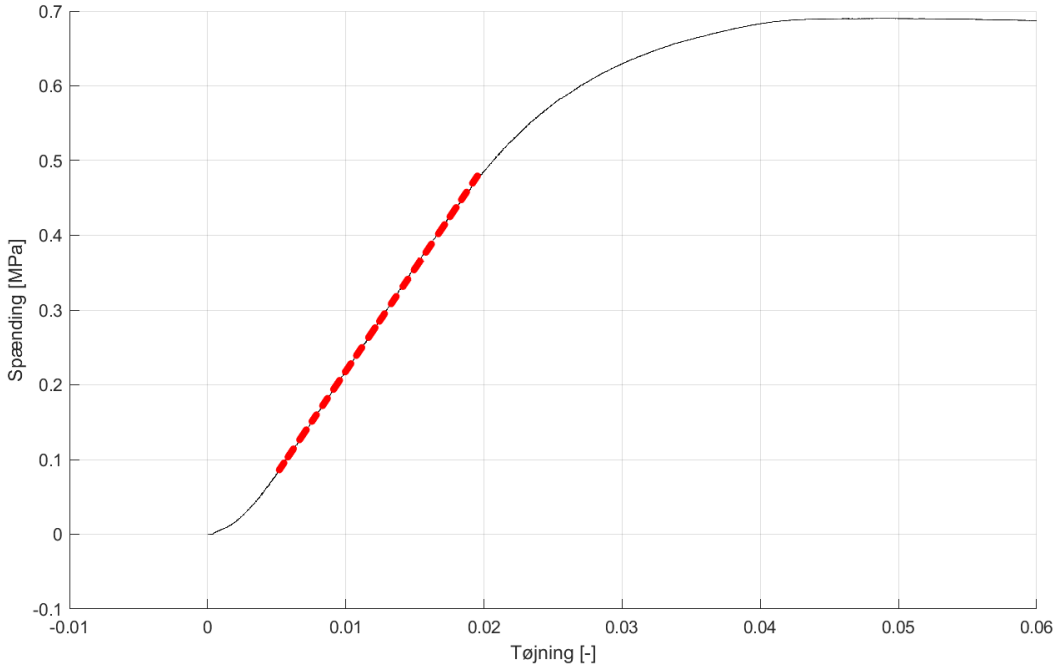


Figur C.12: Spænding som funktion af tøjning på underbunden EPS 250 med 240 mm stabilt grus uden geonet. E-modulet måles langs den stiplede linje til 21,4 MPa.

C.8 EPS 250 - Forsøg på biaksial geonet og stabilt grus

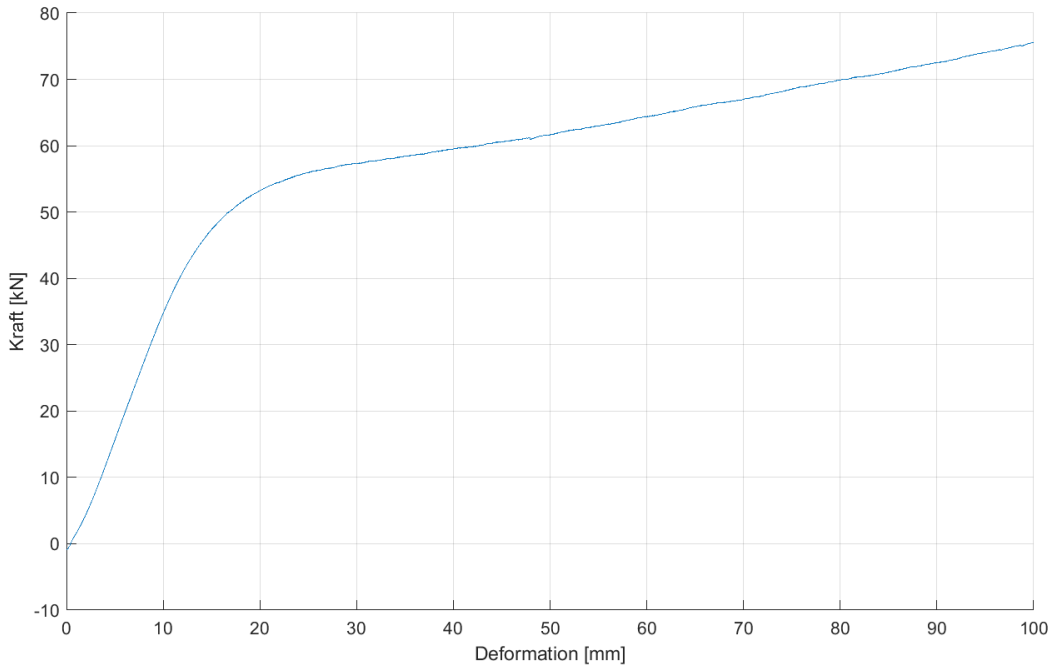


Figur C.13: Kraft som funktion af deformation på underbunden EPS 250 med biaksial geonet og i alt 240 mm stabilt grus.

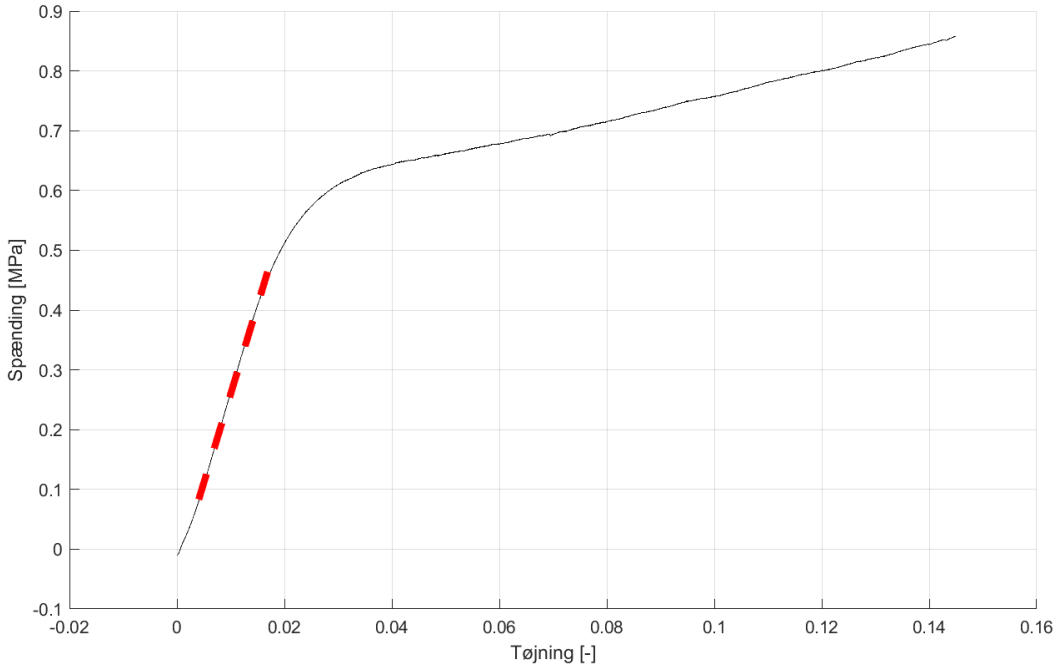


Figur C.14: Spænding som funktion af tøjning på underbunden EPS 250 med med biaksial geonet og i alt 240 mm stabilt grus. E-modulet måles langs den stiplede linje til 27,4 MPa.

C.9 EPS 250 - Forsøg på triaksial geonet og stabilt grus

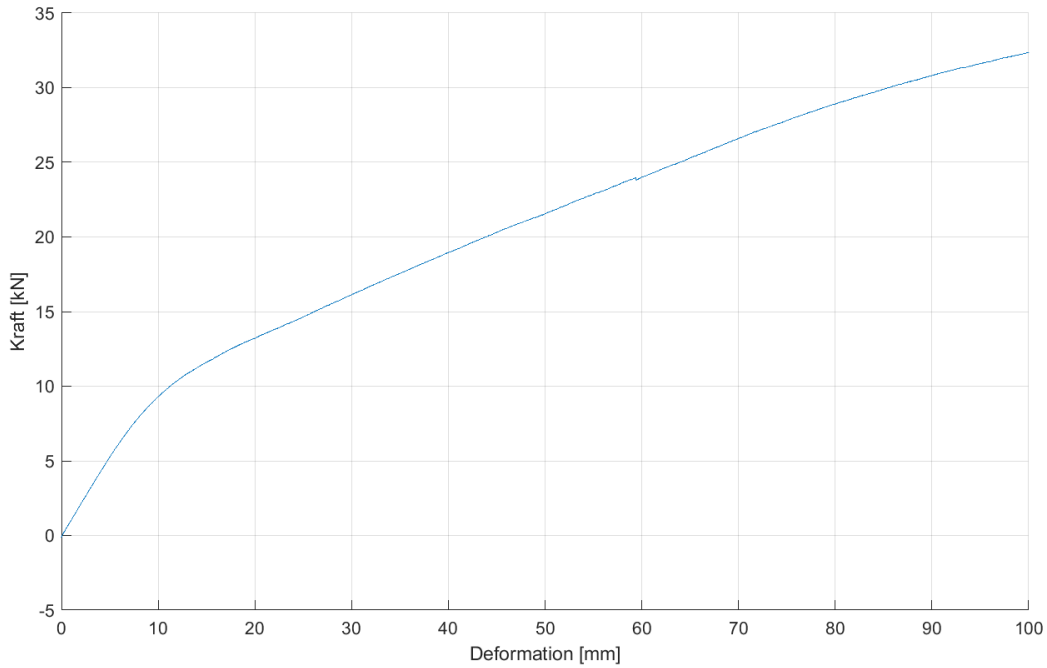


Figur C.15: Kraft som funktion af deformation på underbunden EPS 250 med triaksial geonet og i alt 240 mm stabilt grus.

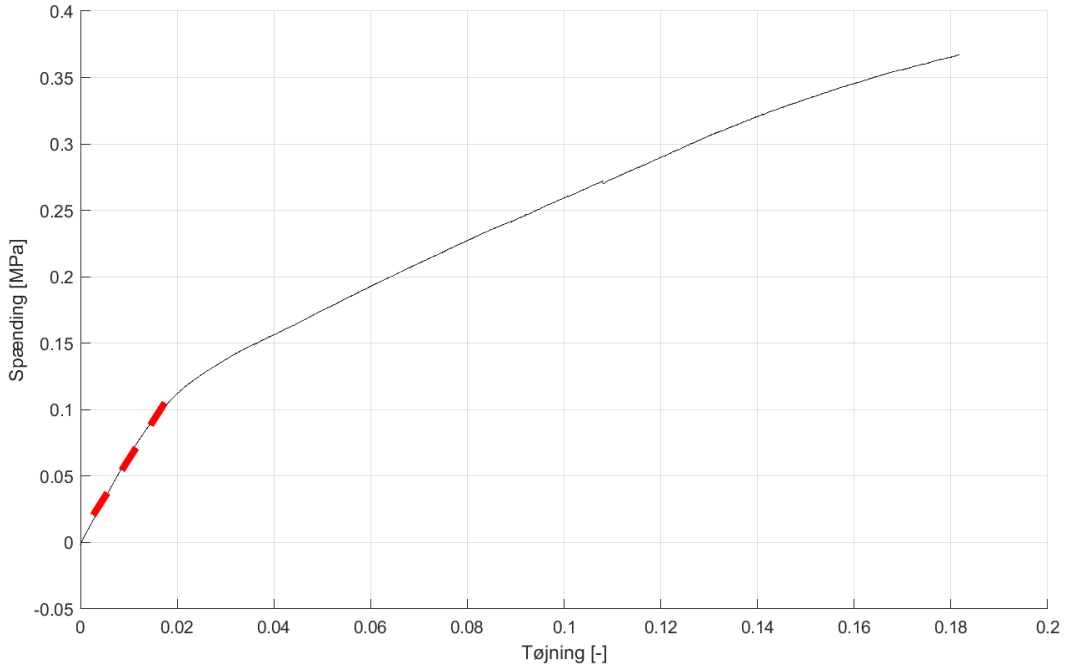


Figur C.16: Spænding som funktion af tøjning på underbunden EPS 250 med med triaksial geonet og i alt 240 mm stabilt grus. E-modulet måles langs den stiplede linje til 29,7 MPa.

C.10 EPS 60 - Reducering af stabilt grus ved triaksial geonet

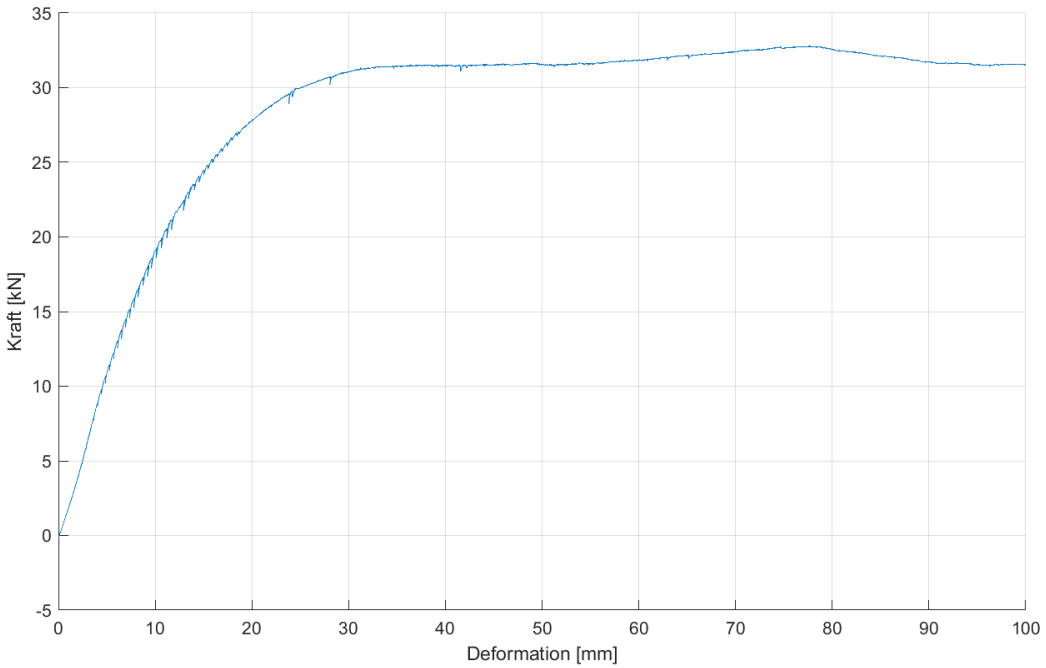


Figur C.17: Kraft som funktion af deformation på underbunden EPS 60 med triaksial geonet og i alt 100 mm stabilt grus.

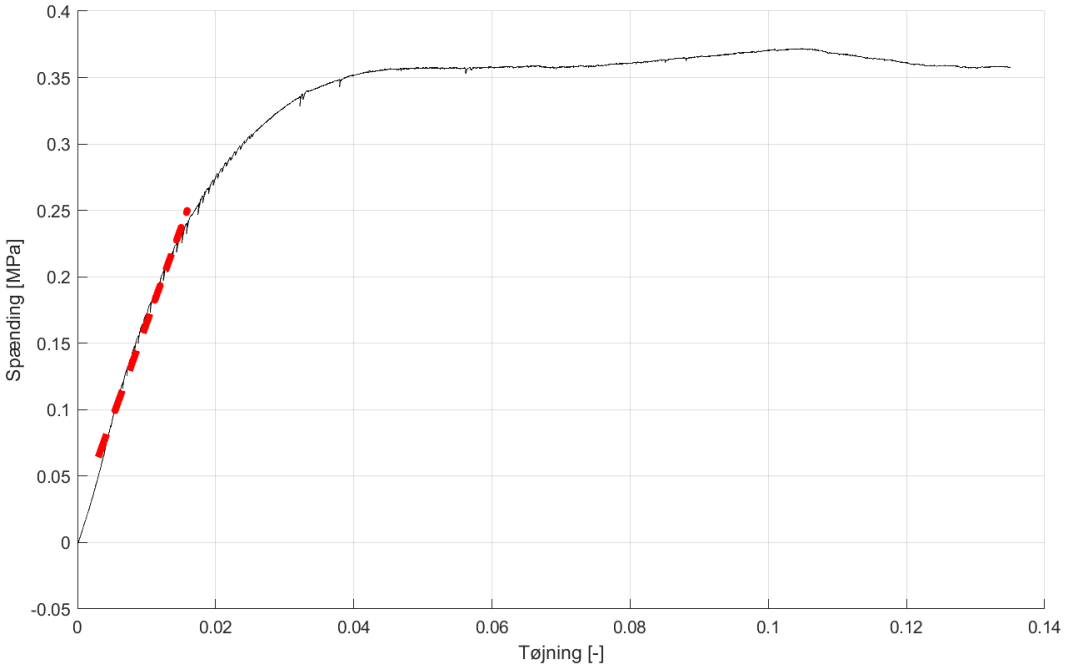


Figur C.18: Spænding som funktion af tøjning på underbunden EPS 60 med triaksial geonet og i alt 290 mm stabilt grus. E-modulet måles langs den stiplede linje til 5,7 MPa.

C.11 EPS 60 - Kontrolforsøg 2 på stabilt grus

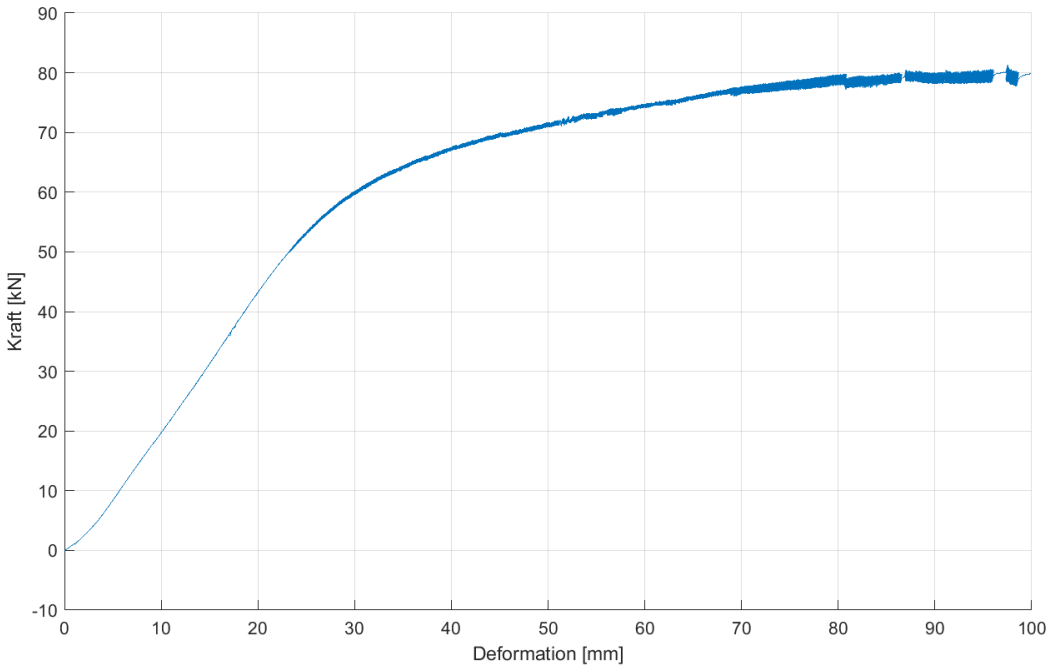


Figur C.19: Kraft som funktion af deformation på underbunden EPS 60 med 290 mm stabilt grus uden geonet.

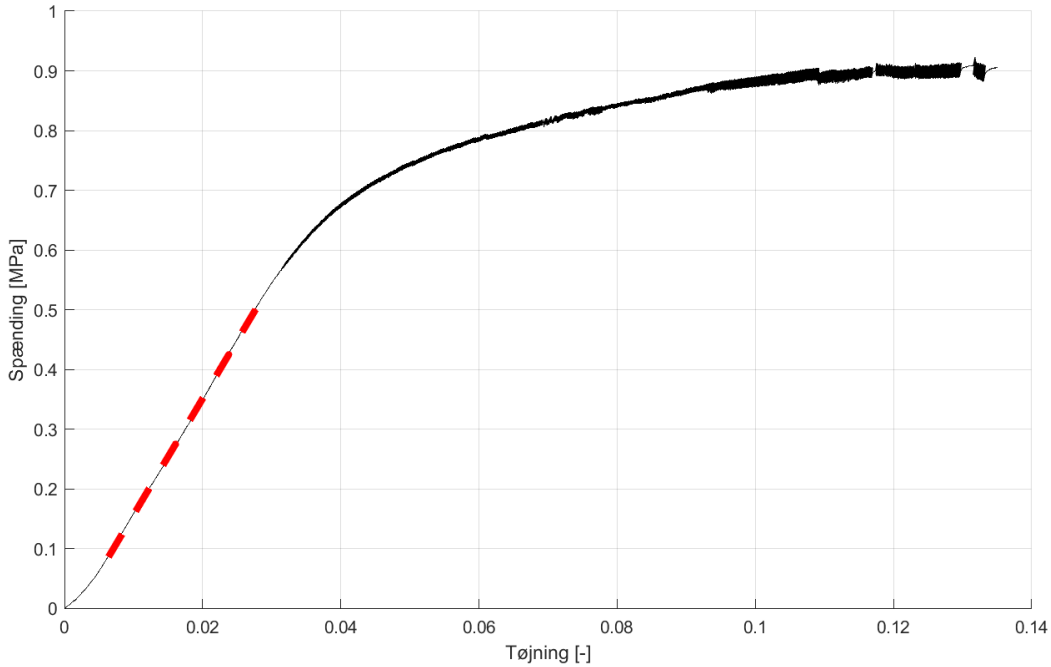


Figur C.20: Spænding som funktion af tøjning på underbunden EPS 60 med 290 mm stabilt grus uden geonet. E-modulet måles langs den stiplede linje til 14,4 MPa.

C.12 EPS 250 - Kontrolforsøg 2 på stabilt grus

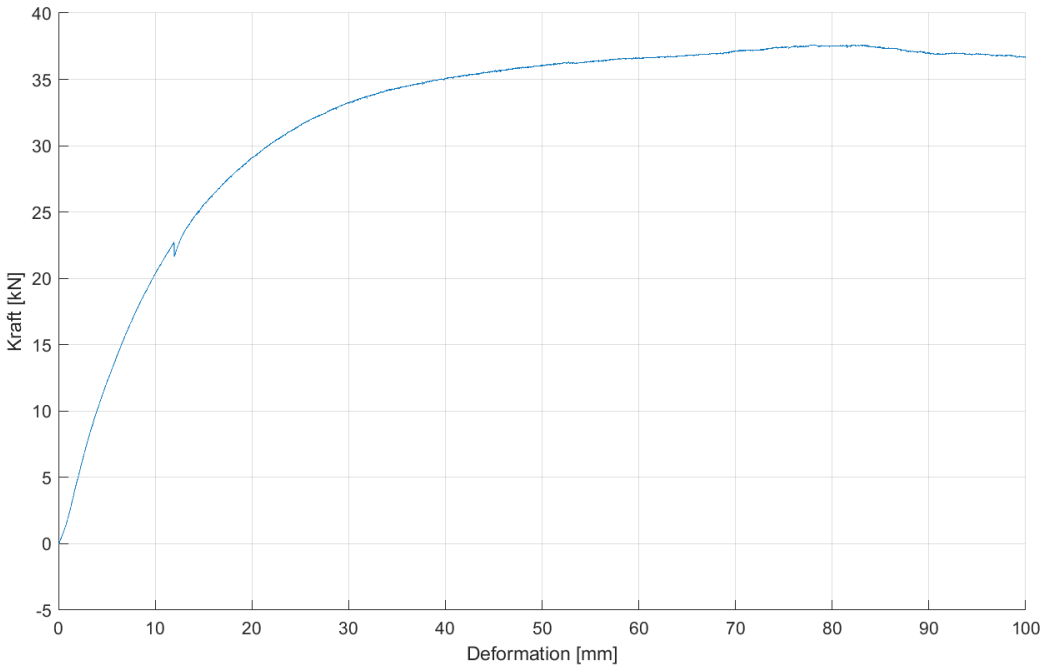


Figur C.21: Kraft som funktion af deformation på underbunden EPS 250 med 290 mm stabilt grus uden geonet.

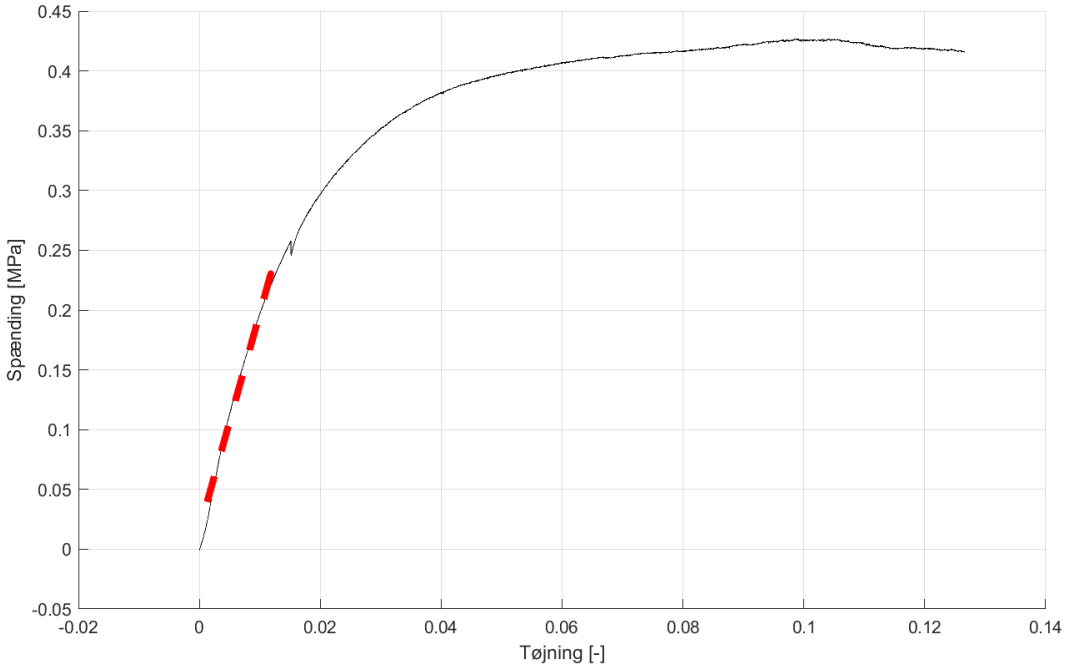


Figur C.22: Spænding som funktion af tøjning på underbunden EPS 250 med 290 mm stabilt grus uden geonet. E-modulet måles langs den stiplede linje til 19,3 MPa

C.13 EPS 60 - Kontrolforsøg 3 på stabilt grus

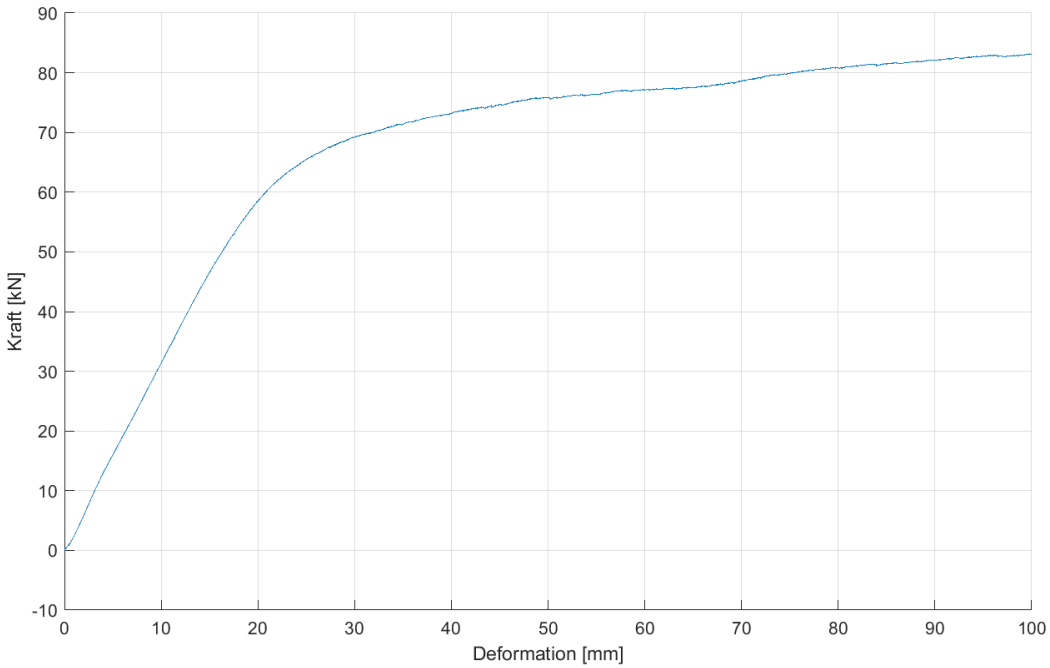


Figur C.23: Kraft som funktion af deformation på underbunden EPS 60 med 340 mm stabilt grus uden geonet.

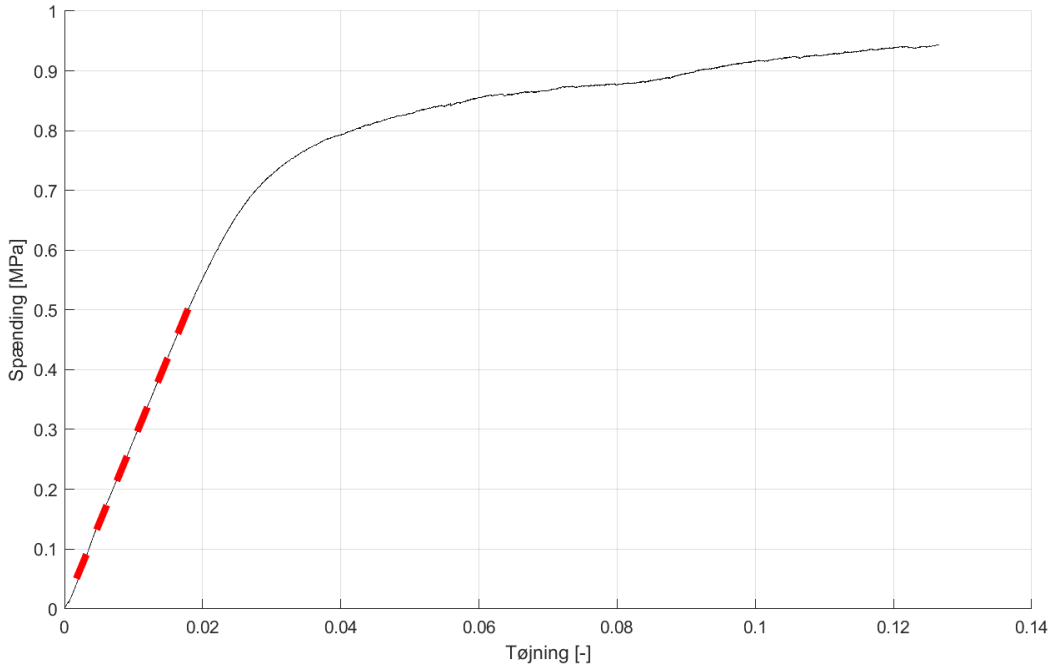


Figur C.24: Spænding som funktion af tøjning på underbunden EPS 60 med 34 mm stabilt grus uden geonet. E-modulet måles langs den stiplede linje til 18,1 MPa.

C.14 EPS 250 - Kontrolforsøg 3 på stabilt grus



Figur C.25: Kraft som funktion af deformation på underbunden EPS 250 med 340 mm stabilt grus uden geonet.



Figur C.26: Spænding som funktion af tøjning på underbunden EPS 250 med 340 mm stabilt grus uden geonet. E-modulet måles langs den stiplede linje til 27,9 MPa.

D Cyklisk pladebelastning

Der er i dette appendiks opstillet en forsøgsrækkefølgen for de cykliske pladebelastningsforsøg udført på opbygningerne med en lagtykkelse på i alt 240 mm.

Efterfølgende er resultaterne fra hver belastningscyklus afbildet. Der er grafisk vist den blivende deformation afhængigt af n-cyklus. Til sidst er den blivende deformation listet i en tabel for hver 100 cyklus for henholdsvis EPS 60 og EPS 250.

D.1 Forsøgsoversigt

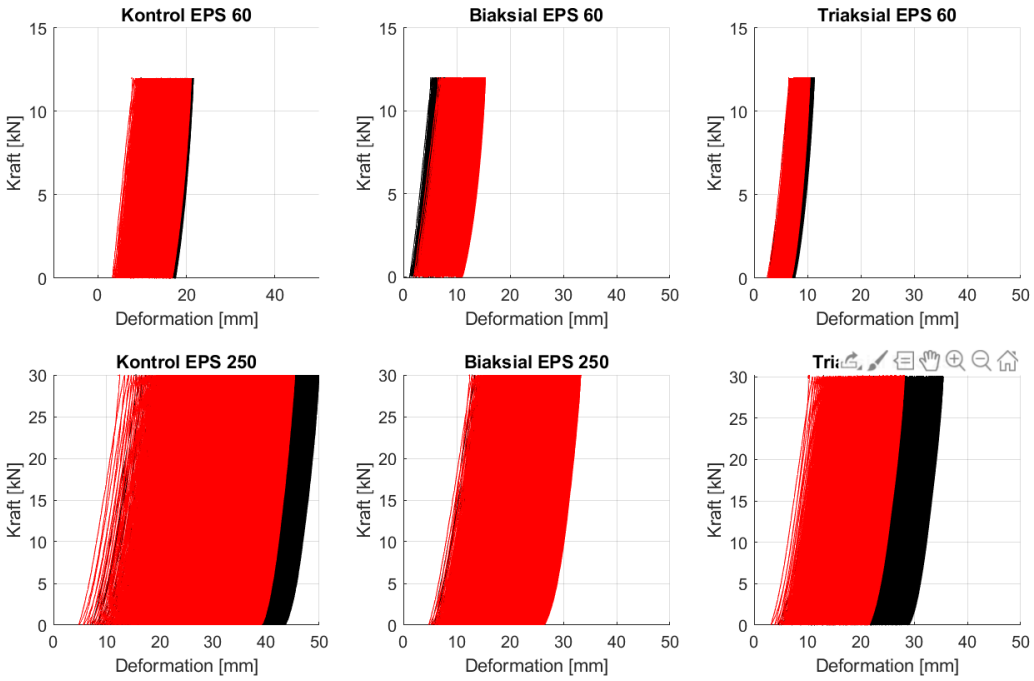
Forsøgsrækkefølge af de statiske pladebelastningsforsøg, som er udført eller startet forsøg.

Tabel D.1: Antal forsøg cyklisk pladebelastning

Cyklisk pladebelastning		
Test 1	Kontrol 1 EPS 60	Brud - for høj last
Test 2	Kontrol 1 EPS 60	Brud - for høj last
Test 3	Kontrol EPS 60	Anvendt
Test 4	Kontrol 1 EPS 60	Anvendt
Test 5	Kontrol 1 EPS 250	Anvendt
Test 6	Kontrol 1 EPS 250	Anvendt
Test 7	Biaksial EPS 250	Anvendt
Test 8	Biaksial EPS 250	Anvendt
Test 9	Triaksial EPS 250	Anvendt
Test 10	Triaksial EPS 250	Anvendt
Test 11	Biaksial EPS 60	Anvendt
Test 12	Biaksial EPS 60	Anvendt
Test 13	Triaksial EPS 60	Fejl i opbygning
Test 14	Triaksial EPS 60	Fejl i opbygning
Test 15	Triaksial EPS 60	Anvendt
Test 16	Triaksial EPS 60	Anvendt
Test 17	Triaksial EPS 60 100 mm	Ikke anvendt

D.2 Hver enkelt belastningscyklus

På figur D.1 er hver enkelt af de 1.000 cyklus afbilledet.

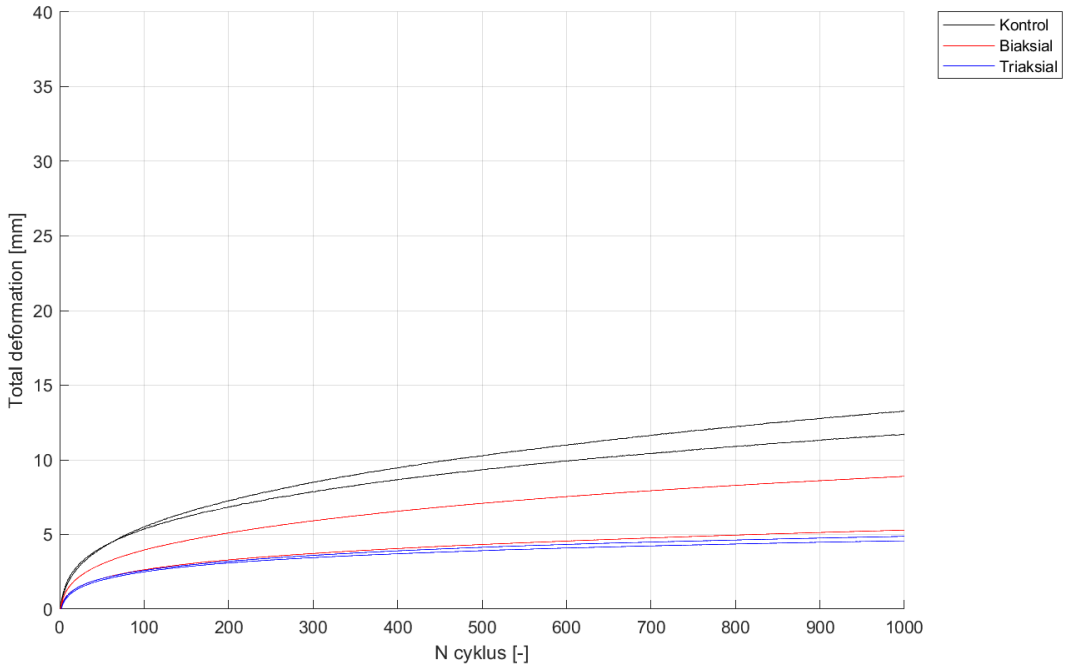


Figur D.1: Hver enkelt cyklus afbilledet. Rød symboliserer den ene forsøg hvor sort symboliserer det andet forsøg.

Figuren viser en forskel mellem de røde og sorte linjer og dermed de to cykliske forsøg. Forskellen bunder primært i, at startpunktet for målingerne ikke har være det samme i begge de udførte test. De cykliske forsøg viser tydeligt, at der sker en forbedring ved indlæggelse af geonet. Forskellen kommer primært til udtryk ved, at der ved belastning med 1.000 cyklusser, opnås en mindre deformation ved opbygningerne med geonet.

D.3 Cyklisk pladebelastning på EPS 60 med 12 kN

Grafen på figur D.2 viser den blivende deformation for hver udførte cyklisk pladebelastning.



Figur D.2: Alle udførte cykliske pladebelastningsforsøg på underbunden EPS 60.

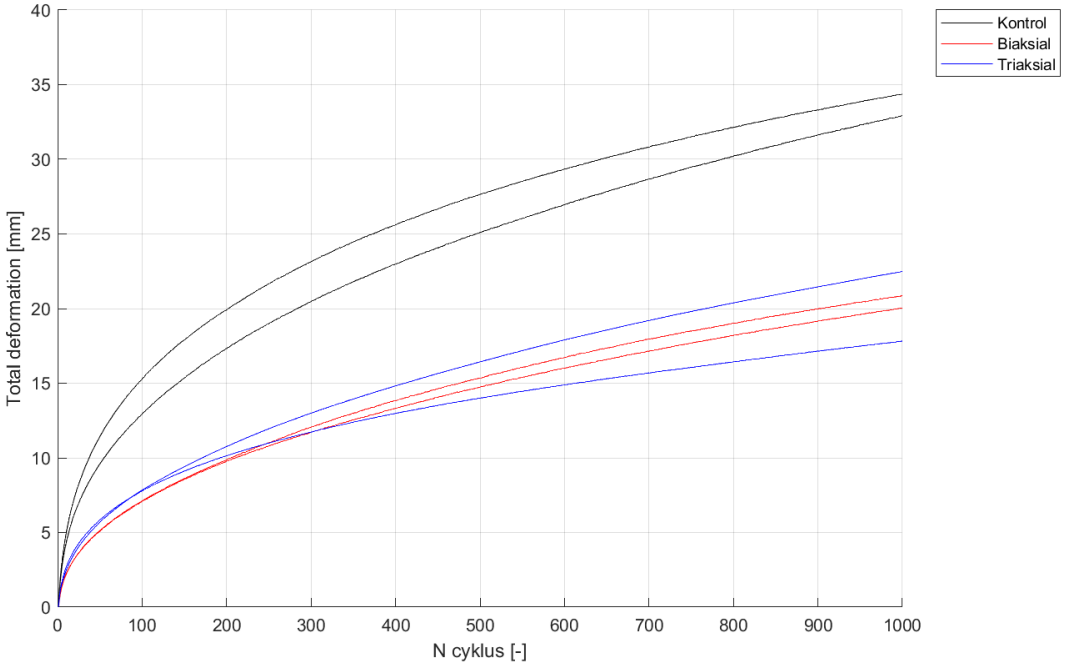
Alle deformationer afhængigt af n cyklus er vist for underbunden med EPS 60 i tabel D.2.

Tabel D.2: Deformation i de takt med udførelse af de cyklisk pladebelastning på underbunden EPS 60.

	Deformation [mm]									
Cyklus	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1.000
Kontrol 1	6,2	7,8	8,9	9,7	10,4	11,0	11,6	12,1	12,5	12,9
Kontrol 2	5,4	7,3	8,5	9,5	10,4	11,1	11,8	12,4	13,0	13,5
Biaksial 1	2,9	3,6	4,1	4,5	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8
Biaksial 2	4,0	5,2	6,1	6,7	7,3	7,7	8,1	8,5	8,8	9,1
Triaksial 1	2,6	3,2	3,6	3,9	4,1	4,3	4,5	4,6	4,8	4,9
Triaksial 2	2,5	3,1	3,4	3,7	3,9	4,1	4,2	4,4	4,5	4,6

D.4 Cyklisk pladebelastning på EPS 250 med 30 kN

Grafen på figur D.3 viser den blivende deformation for hver udførte cyklisk pladebelastning.



Figur D.3: Alle udførte cykliske pladebelastningsforsøg på underbunden EPS 250.

Alle deformationer afhængigt af n cyklus er vist for underbunden med EPS 250 i tabel D.3.

Tabel D.3: Deformation i de takt med udførelse af de cykliske pladebelastning på underbunden EPS 250.

	Deformation [mm]									
Cyklus	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1.000
Kontrol 1	16,3	21,2	24,6	27,2	29,3	31,0	32,6	33,9	35,1	36,2
Kontrol 2	13,6	18,2	21,5	24,1	26,3	28,2	29,9	31,5	33,0	34,2
Biaksial 1	7,1	10,0	12,1	13,8	15,3	16,6	17,8	18,8	19,8	20,7
Biaksial 2	7,3	10,2	12,4	14,2	15,8	17,2	18,5	19,5	20,6	21,5
Triaksial 1	9,0	12,1	14,5	16,5	18,2	19,7	21,1	22,4	23,5	24,6
Triaksial 2	7,9	10,3	12,0	13,3	14,3	15,3	16,1	16,9	17,7	18,4

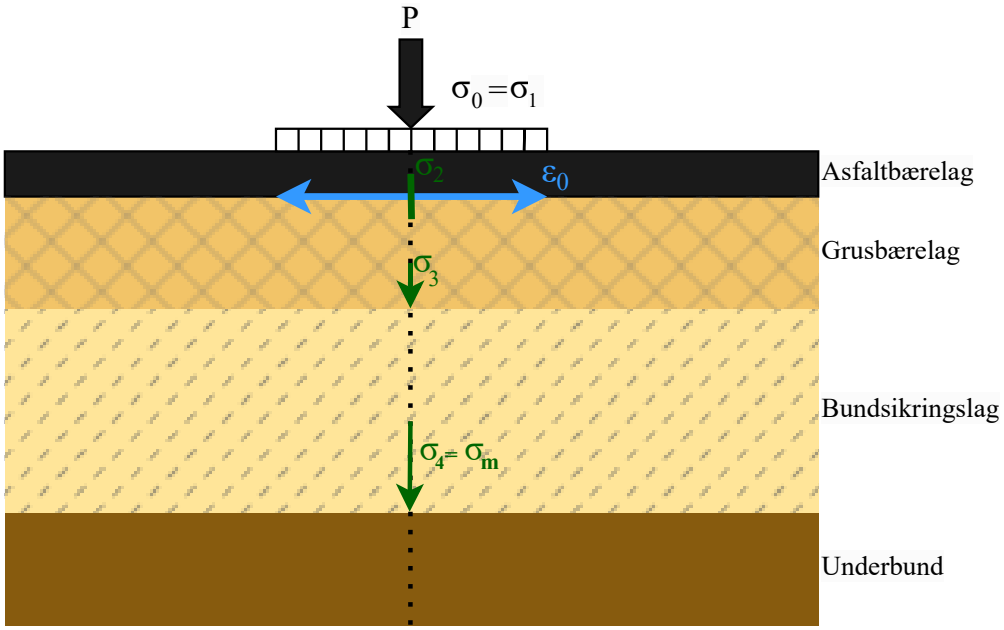
E MMOPP

Programmet MMOPP kan dimensionere vejopbygninger på to forskellige måder, analytisk dimensionering eller simulation. Simulation dimensionerer befæstelser ved, at simulere nedbrydningsforløb ud fra en klimamodel til at overholde en standardiseret eller valgt levetid. Der i dette speciale valgt udelukkende, at dimensionere ved brug af analytisk dimensionering. Der er valgt analytisk dimensionering, da metoden med simulation ikke er udviklet tilstrækkeligt til at være mere korrekt end analytisk, samt at klimamodellen i programmet dimensionere efter er af ældre dato (Bolet og Busch, 2016). Det er derfor vurderet, at analytisk dimensionering er tilstrækkelig til dette speciale.

E.1 Analytisk dimensionering

Ved analytisk dimensionering i MMOPP, indtastes en ønsket levetid, normalt regnes der med 20 år. Det er muligt, at justere manuelle lagtykkelser og E-moduler af alle materialerne. Analytisk kan anvendes til at dimensionere fleksible befæstelser og forstærkede befæstelser, som i dette tilfælde med geonet, da E-modul kan ændres. (Bolet og Busch, 2016)

Dimensioneringen sker ved mekanistiske-empirisk metode. De bundne lag i en vejopbygning er asfaltbærelaget. Disse lag optager træktøjningerne fra trafikbelastning, hvor de ubunde lag, grusbærelag og bundsikring optager de lodrette trykspændinger fra trafikbelastning. Den mekanistiske-empirisk metode fremgår af figuren E.1. (Bolet og Busch, 2016)



Figur E.1: Spændings- og tøjningsoptagelse igennem vejopbygning. Ved dimensionering skal det sikres, at den vandrette tøjningen i undersiden af asfaltlaget, ϵ_0, er mindre end det tilladelige. De lodrette spændinger, σ, skal ligeledes sikres for oversiden af hvert lag, at de er mindre end det tilladelige. (Bolet og Busch, 2016)

Den analytisk-emperiske dimensioneringsmetode er baseret på lineær elastiske beregninger med uendelig vandret udstrækning af lagene. Lagtykkelserne fastlægges ud fra dimensioneringskriterierne for spænding og tøjning. Udtrykkene stammer fra Boussinesq's formler. (Ad hoc-gruppe Vejregelgruppe Dimensionering, 2022)

De tilladelige trykspændinger på oversiden af laget er defineret ved σ og de tilladelige største vandrette træktøjninger på undersiden af asfaltlaget er defineret ved ϵ. Udtrykkene fremgår af E.1 og E.2. (Ad hoc-gruppe Vejregelgruppe Dimensionering, 2022)

Størst tilladelig lodret trykspænding på oversiden af grusbærelaget:

$$\sigma_z = 0{,}086\text{MPa} \cdot \left(\frac{\text{E}}{160\text{MPa}}\right)^{1{,}06} \cdot \left(\frac{\text{N}_{\text{Æ10}\cdot}}{10^6}\right)^{-0{,}25} \tag{E.1}$$

Største tilladelig vandret træktøjning i undersiden af asfaltlaget:

$$\epsilon_h = -0{,}000250 \cdot \left(\frac{\text{N}_{\text{Æ10}}}{10^6}\right)^{-0{,}191} \tag{E.2}$$

Disse udtryk sammenholder trafikmængden udtrykt ved den dimensionsgivende trafikbelastning og de dynamiske påvirkninger, som tillades i de enkelte lag. Det er i Danmark maksimalt tilladt at køre med et 10-tons akseltryk, som ca. kan omregnes til et tryk på 100 kN.

E.2 Planum

I programmet er det muligt at vælge underbundens styrke. Underbunden er inddelt i tre grupper, som er afgørende for risikoen for frost i underbunden. Frost i underbunden, kan føre til skadelige frosthævninger, dette afhænger af jordtypen, som kan klassificeres ved geoteknisk boring og undersøgelser. Der er tre valgmuligheder i MMOPP, frostfarlig, frosttvivlsom og frostsikker underbund. Grænsen for hvilken frostgruppe jordtypen tilhøre fremgår af tabel E.1. (Ad hoc-gruppe Vejregelgruppe Dimensionering, 2022)

Tabel E.1: Bestemmelse af frost-klasse ud fra E-modul.(Ad hoc-gruppe Vejregelgruppe Dimensionering, 2022)

Frosthævningsrisiko	**E-modul [MPa]**
Frostsikker	100
Frosttvivlsom	40
Frostfarlig	20

Dette betyder, at der i forsøget er anvendt en underbund som afhængigt af jordtypen vil klassificeres som frosttvivlsom eller frostfarlig, eftersom underbundens E-modul er bestemt til henholdsvis 1,4 og 7,5 MPa. Denne frostklasse anvendes i dimensioneringsprogrammet til at fastsætte koblingshøjden, for at sikre, at der ikke sker frostskader i vejens bærende lag. Efter frostklasse fastsættes koblingshøjden ud fra trafikklasse og jordmateriale. Dette fremgår af figur E.2.

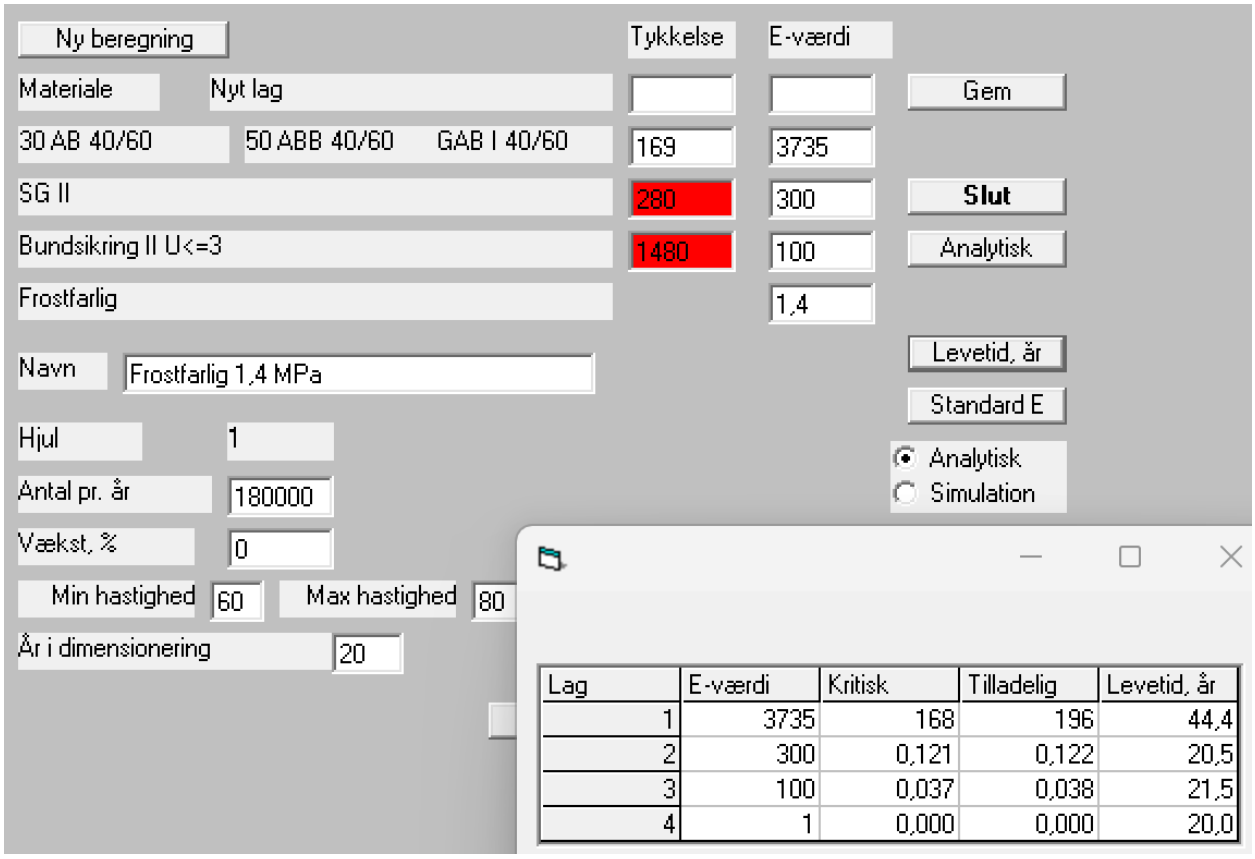
Tabel E.2: Bestemmelse af frost-klasse ud fra jordtype.(Ad hoc-gruppe Vejregelgruppe Dimensionering, 2022)

	Mindste koblingshøjdel		
Frosthævningsrisiko	Frostsikker	Frosttvivlsom	Frostfarlig
Jordtype Trafikklasse	Sand og grus uden betydende partier af silt og siltholdig ler	Moræneler, ler og stabiliseret underbund	Silt og meget siltholdige jordarter med mulighed for vandtilførsel, forbrændingsslagge og flyaske og stabiliseret underbund
T0,T1	Som bestemt ud fra	400 mm	500 mm
T2	Analytisk-Empirisk	500 mm	700 mm
T3	Dimensionering	600 mm	600 mm
T4, T5, T6, T7		700 mm	900 mm

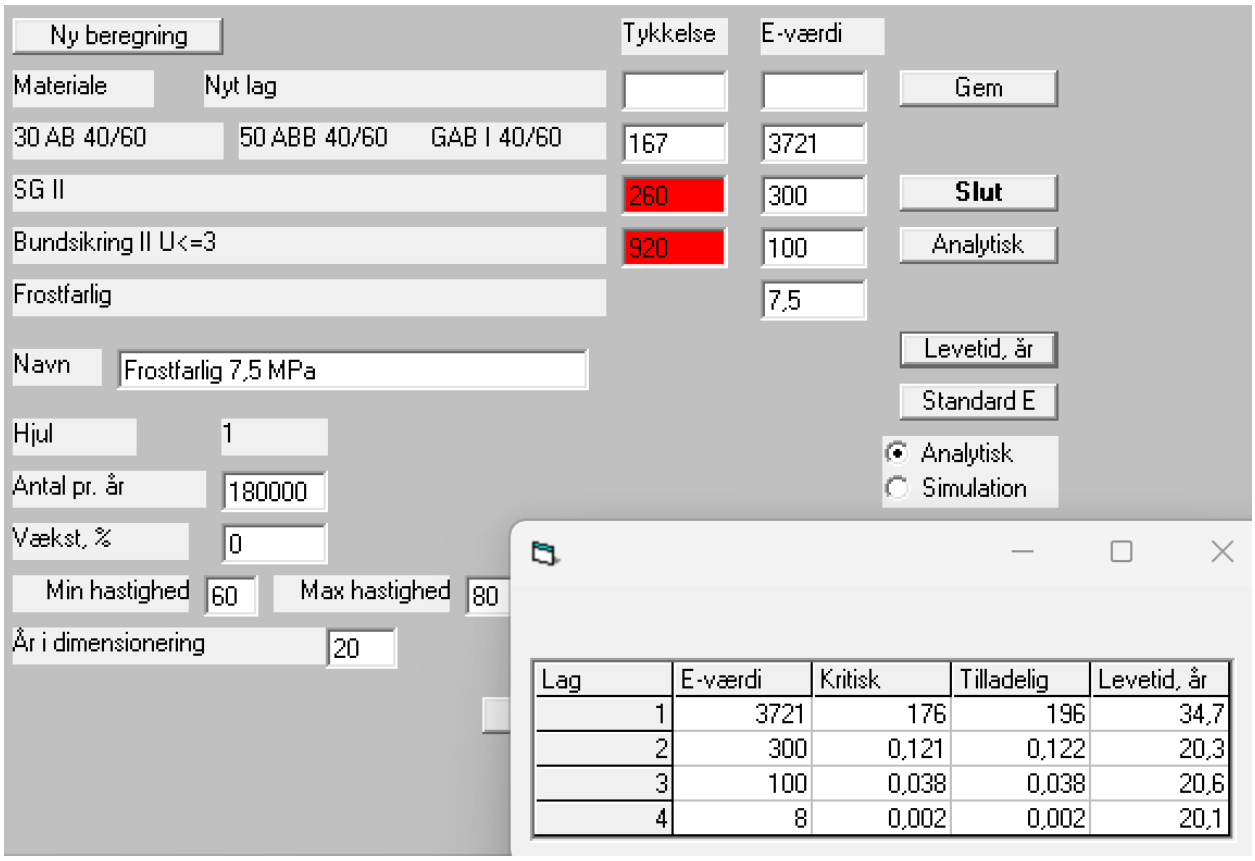
Tabellen viser, at hvis der er tale om en frostsikker underbund, kan MMOPP alene beregne tykkelsen på bundsikringslaget og uden der er risiko for frost i bærelagene. I dette speciale undersøges muligheden ved både en frostfarlig eller frosttvivlsom underbund. Dette betyder, at koblingshøjden minimalt skal være henholdsvis 700 og 900 mm, for at sikre sig mod vejkassen mod frost. Yderligere er koblingshøjden af bundsikring også med til at sikre vejen drænes for vand, så vand ikke kan forringe styrken af vejopbygningens bærelag.

E.3 MMOPP-beregninger

Dimensioneret vejkasse ud fra underbund, trafikklasse og levetid.

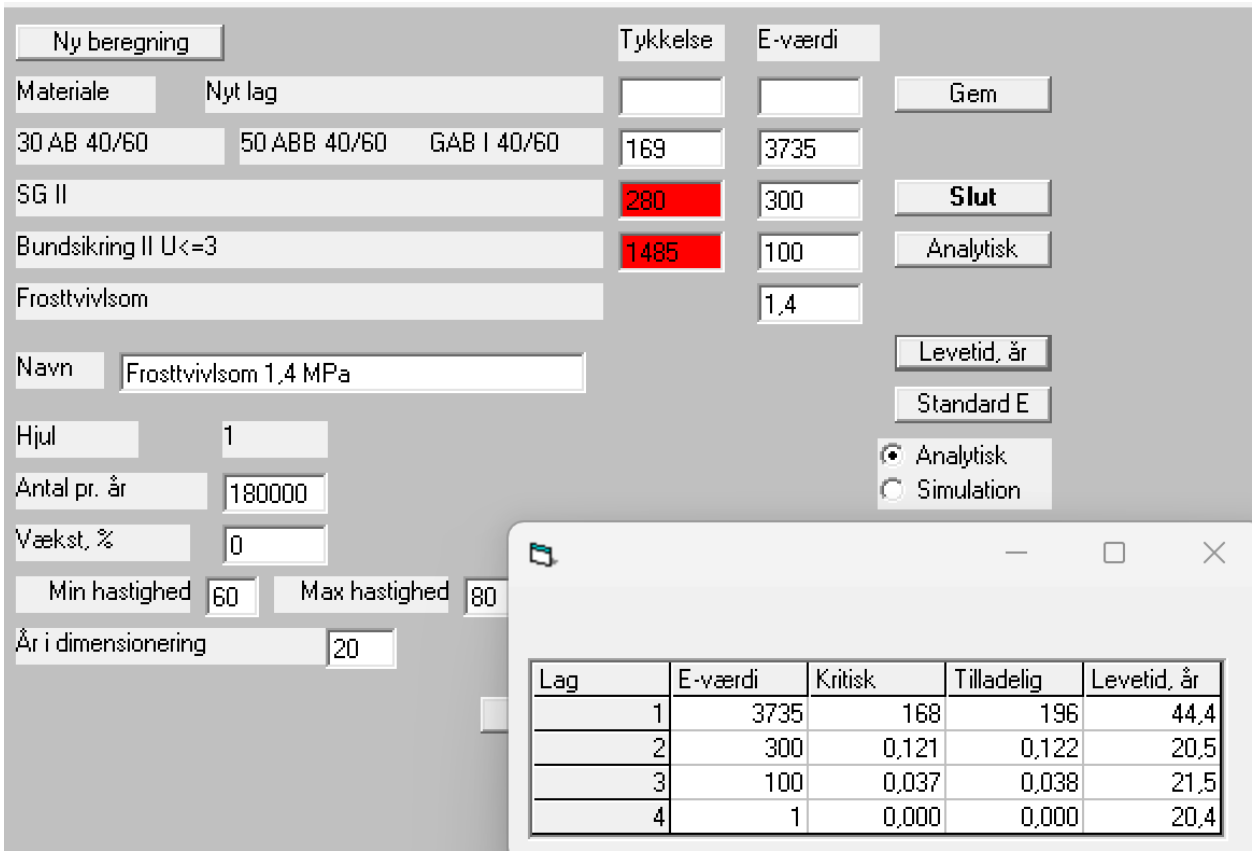


Figur E.2: MMOPP-beregning frostfarlig med underbund på 1,4 MPa med trafikklasse T5.

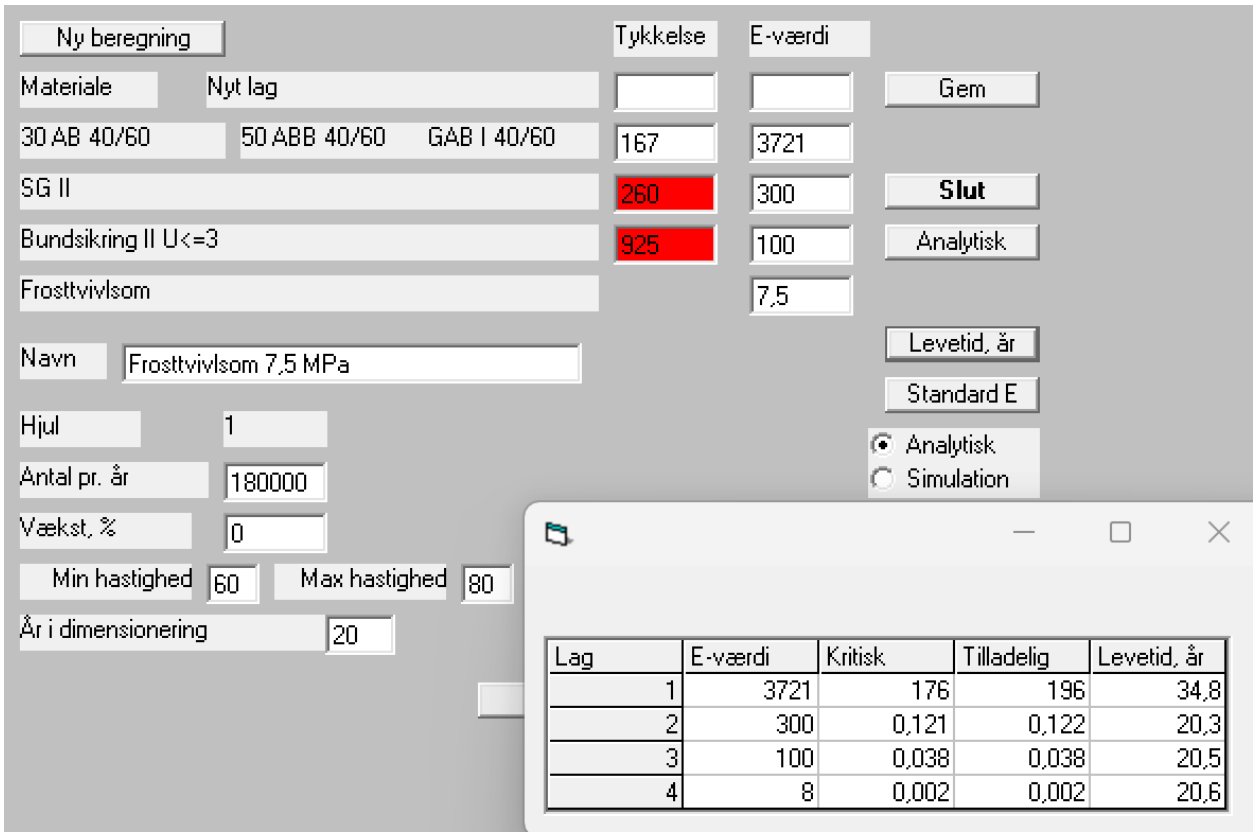


Lag	E-værdi	Kritisk	Tilladelig	Levetid, år
1	3721	176	196	34,7
2	300	0,121	0,122	20,3
3	100	0,038	0,038	20,6
4	8	0,002	0,002	20,1

Figur E.3: MMOPP-beregning frostfarlig med underbund på 7,5 MPa med trafikklasse T5.



Figur E.4: MMOPP-beregning frosttvivlsom med underbund på 1,4 MPa med trafikklasse T5.



Figur E.5: MMOPP-beregning frosttvivlsom med underbund på 7,5 MPa med trafikklasse T5.

MMOPP-beregninger viser røde felter ved bundsikring og stabilt grus. Grunden til dette er, at lagtykkelserne skal skal lægges over flere omgange for at opnå den optimale komprimering. Den maksimale lagtykkelse, som hvert lag må udlægges ad gangen, er vist i tabel E.3.

Tabel E.3: E-værdier og anbefalet udlægningstykkelse . * De maksimale lagtykkelser er anbefalet til udlæggelse i et lag. Ved ønske om større lagtykkelse kan materialet udlægges af flere omgange. (Ad hoc-gruppe Vejregelgruppe Dimensionering, 2022)

Materiale	**AB**	**GAB I**	**SG II**	**BL**
E-værdi [MPa]	3.000	3.000	300	100
Anbefalet min. tykkelse [mm]	30	60	100	200
Anbefalet maks. tykkelse [mm] udlagt i ét lag*	40	110	250	300

F CO_2-aftryk ved indlæggelse af geonet

Nedenfor fremgår CO_2e for faserne fra fremstilling til anvendelse fremgår af tabel F.1.

Tabel F.1: Beregnet udledning af CO_2e i produktfaserne A1-A3, råvareforsyning, transport og fremstilling, samt anlægsfaserne A4-A5, transport, bygge- og anlægsproces, jf. figur 11.1 i kapitel 11.

	[kg CO_2e/m^2]	[kg CO_2e/m^3]
	A1-A3	
Stabilt grus	-	7,34
Biaksial geonet	1,01	-
Triaksial geonet	0,52	-
	A4	
Stabilt grus	-	9,26
Biaksial geonet	0,0081	-
Triaksial geonet	0,0081	-
	A5	
Stabilt grus	-	0,24
Biaksial geonet	0,00	-
Triaksial geonet	0,00	-

G Sammenligning med Byggros designdiagrammer

Byggros definerer deres bærelag ved, at det ubundet bærelag, stabilt grus, udgør en tredjedel af opbygningen med bundsikring og stabilt grus. I tabel G.1 fremgår de aflæste lagtykkelser fra designdiagrammer af BG Byggros A/S (2023), hvor det dertilhørende ubundet bærelag af stabilt grus er beregnet.

Tabel G.1: Aflæste ækvivalente lagtykkelser jf. designdiagrammer af BG Byggros A/S (2023) afhængig af underbund. De ubundne materiale udgør bundsikring, BG, og stabilt grus, SG.

Type	BG og SG [mm]	SG [mm]	Besparelse SG [mm]
Underbund på 1,4 MPa			
Opbygning uden geonet	1.600	533	-
Biaksial opbygning	1.100	367	167
Triaksial opbygning	1.050	350	183
Underbund på 7,5 MPa			
Opbygning uden geonet	1.100	367	-
Biaksial opbygning	750	250	117
Triaksial opbygning	700	233	133

Af tabel G.2 fremgår beregnede lagtykkelser af de ubundet bærelag med udgangspunkt i den samme lagtykkelse af stabilt grus, som fremgår af tabel G.1. De lineære tendenslinjer er tidligere defineret i kapitel 9. Der er ud fra de lineære tendenslinjer, beregnede de nødvendige lagtykkelser for at opnå samme styrke i den uarmerede som den armede opbygning.

Tabel G.2: Beregnede ækvivalente lagtykkelser ud fra lineære tendenslinjer.

Type	Lineær tendenslinje	SG [mm]	Besparelse SG [mm]
Underbund på 1,4 MPa			
Opbygning uden geonet	y = 0,0536x + 1,7142	530	-
Biaksial opbygning	y = 0,0740x + 2,3686	375	155
Triaksial opbygning	y = 0,0848x + 2,7131	323	207
Underbund på 7,5 MPa			
Opbygning uden geonet	y = 0,0652x + 8,3593	370	-
Biaksial opbygning	y = 0,0836x + 10,718	260	110
Triaksial opbygning	y = 0,0905x + 11,613	231	139