

Anvendelse af rundkornede materialer i stabilgrus til vejbygning



Kandidatspeciale
Vej- og Trafikteknik
Institut for Byggeri & Anlæg
Aalborg Universitet
Jeppe V. Kristensen & Nicolai Sørensen

Det Teknisk-Naturvidenskabelige Fakultet
Institut for Byggeri og Anlæg
Sohngårdsholmsvej 57
9000 Aalborg
Telefon 9940 8375
<http://www.trafik.aau.dk>

Kandidatspeciale

Titel: Anvendelse af rundkornede materialer i stabilgrus til vejbygning.

Master's thesis

English title: Use of weathered materials as base course for roadbuilding.

Projektperiode:

Forårssemesteret
2014

Gruppemedlemmer:

Jeppe Vestergaard Kristensen

Nicolai Sørensen

Vejleder:

Benjaminn Nordahl Nielsen

- Oplagstal: 4
- Sidetal: 66
- Bilagsantal: 7
- Afsluttet den: 10-06-2014

Synopsis:

Stabilgrus af bakkematerialer, er et af de mest anvendte materialer til vejbyggeri. Da de naturlige ressourcer af egnede materialer, i visse landsdele, er en forsvindende ressource, tænkes der at være et alternativ hertil. Ifølge de danske vejregler må stabilgrus II, der anvendes som ubundet bærelag, indeholde op til 70% runde korn. Herved tænkes det muligt, at blande stabilgrus af mindre andele bakkematerialer, med et tilslag af rundkornede materialer, således det stadig overholder gældende krav. Samtidig ønskes det at skabe et sammenhængende og stærkt materiale, som kan klare nuværende samt fremtidige trafikklaster, på trods af en situation med mangel på materiale til stabilgrus.

Gennem laboratorie- og feltforsøg testes færdigblandet stabilgrus, med forskelligt indhold af runde materialer, i forhold til overflade E-modul ved indbygning. Målingerne af E-modul i felten, udføres med let faldlod, da dette i nogen grad på nuværende tidspunkt, anvendes til kvalitetskontrol af anlægsarbejder i Danmark. For at afgrænse måleområdet, indbygges et udsnit af en normal vejopbygning, i en testform med afgrænsede sider.

Rapportens indhold er frit tilgængeligt, men offentliggørelse (med kildeangivelse) må kun ske efter aftale med forfatterne.



Forord

Denne specialerapport er udarbejdet af Jeppe V. Kristensen og Nicolai Sørensen, på 10. semester på vej- og trafikteknik ingeniøruddannelsen ved Aalborg Universitet. Rapporten omhandler mulighederne for brug af rundkornede materialer i stabilgrus til vejbygning. Der er udelukkede set på disse muligheder i forhold til danske forhold samt danske vejledninger og krav.

Gennem projektperioden har mange personer ydet stor hjælp og givet flere gode råd og inputs.

Der skal lyde en stor tak til hovedvejleder på projektet; Benjaminn Nordahl Nielsen, AAU. En stor tak skal også lyde til Kroghs A/S, og især underdirektør Lars Andersen, for udlevering af materialer til stabilgrusfremstilling og faglig diskussion omkring emnet. Der skal også lyde stor tak til Andreasen og Hvidberg A/S og specielt Kaj Kristensen, for lån og transport af udstyr i forbindelse med projektet.

Yderligere en stor tak skal også lyde til laboratoriepersonalet på AAU, for stor hjælp med praktiske problemstillinger samt råd og vejledning. Slutteligt skal der lyde en tak til følgende personer, for sparring og hjælp til projektet:

- Poul Erik Jakobsen, Grontmij
- Thomas Rohde, Vejdirektoratet
- Flemming Berg, Vejdirektoratet
- Susanne Baltzer, Vejdirektoratet

God læselyst.



Summary

The main objective of this project is to test the influence of weathered aggregates in unbound base course materials.

It is becoming difficult to find useful aggregates for base course materials, in some parts of Denmark. This means that the amounts of useful aggregates from gravel pits are becoming a decreasing resource. The aggregates used in Denmark, are divided into two groups and classified as Stabilgrus I (SG I) and Stabilgrus II (SG II). These two types of aggregates are made from common European standards, which all countries in the EU are restricted to follow. The two types of base course materials have different criteria, depending on quality. It means that the SG I for example, only may contain up to 50% rounded particles where the SG II may contain up to 70% rounded particles. This means that it's possible and aloud to add weathered aggregates from the sea, to the base course material and still be able to follow the common standards.

The question is then:

Is it possible to use weathered materials, as equals of gravel pit materials in SG II, in a mix of up to 70% weathered materials and still be able to obtain standard qualities and still be able to incorporate the base course material in a road segment?

It is decided to create four different mixtures of unbound base course materials, containing 0%, 20%, 40% and 70% weathered materials. These mixtures are built into a segment of road, in a testing box. The testing box contains a layer of subbase material and on top of that, a layer of base course material.

The testing box method has been used in earlier projects and by results from these, it is confirmed to be a reliable method of testing unbound base course materials.

It has been decided to test the mixes of SG II E-modular, with a light falling weight deflectometer (LFWD). The LWFD has the force of being easy to use and setup in situ. This together with a CPN nuclear gauge will be the testing devices in this project. The CPN measures the amount of compaction in the different layers of materials.

The mixtures of SG II are built into the test box and overrun by a compaction device in a certain pattern. The mixtures are afterwards tested by a cycle of 20 rams from the LFWD (10 rams from a low falling height and then 10 from high falling height). It is then possible to determine the materials different modulus of elasticity. All the mixes have been examined in series of laboratory tests before they were incorporated and tested in the field. The laboratory tests were necessary in accordance to the European standards. By these tests, there have been drawn and controlled curves of the particles size for all mixtures.

During the tests, several literatures are used. All mixes has been made in accordance to the Danish road authorities and the common European standards. From the testing there can be concluded the following headlines:

It is possible to mix a base course material with an amount of 70% weathered materials in accordance with the common standards.

A base course material with an amount of weathered material more than 40% is not suitable for road building, because it's not manageable.

The guidelines from the Danish road authorities in the use of the LFWD need a review, due to the low info about the general use of the LFWD.

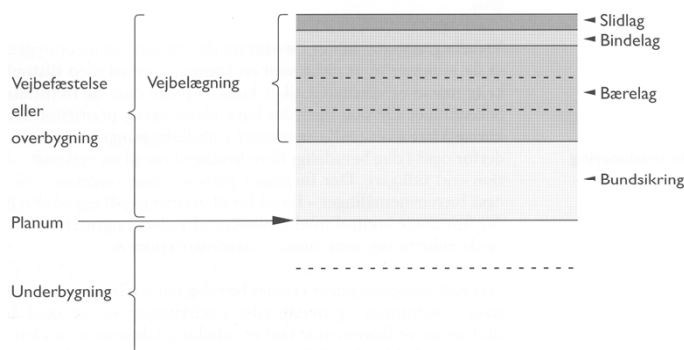
Indholdsfortegnelse

| | |
|--|-----------|
| Kapitel 1 Indledning | 1 |
| 1.1 Problemstilling | 3 |
| Kapitel 2 Metode | 5 |
| 2.1 Litteraturstudie | 5 |
| 2.2 Forudsætninger og antagelser | 8 |
| 2.2.1 Trafikale forudsætninger | 8 |
| 2.2.2 Stabilgrus som materiale | 10 |
| 2.2.3 Stabilgrus I | 11 |
| 2.2.4 Stabilgrus II | 12 |
| Kapitel 3 Forsøg | 15 |
| 3.1 Materialeklassificering | 15 |
| 3.1.1 Sigteanalyse | 16 |
| 3.1.2 Sandækvivalent | 18 |
| 3.1.3 Optimalt vandindhold | 19 |
| 3.2 Prøveopstilling | 22 |
| 3.3 Forsøgsbeskrivelse | 24 |
| 3.4 Forsøgsfremgangsmåde | 25 |
| 3.4.1 Indbygning af bundsikringslag | 25 |
| 3.4.2 Delkontrol af bundsikringslag | 25 |
| 3.4.3 Indbygning af stabilgrus | 25 |
| 3.4.4 Måling af E-modul på overflade af stabilgrus | 26 |
| 3.5 Udstyr | 28 |
| 3.5.1 Let faldlod | 28 |
| 3.5.2 CPN isotopsonde | 29 |
| 3.5.3 Pladevibrator | 31 |
| Kapitel 4 Resultater | 33 |
| 4.1 Planumundersøgelse | 34 |
| 4.2 Bundsikring | 35 |
| 4.3 0% Rundkornet materiale | 37 |
| 4.4 20% Rundkornet materiale | 40 |
| 4.5 40% Rundkornet materiale | 44 |
| 4.6 70% Rundkornet materiale | 48 |
| 4.7 Sammenstilling af resultater | 51 |
| 4.8 Materiale E-modul | 52 |
| 4.9 Regressionsanalyse | 54 |
| 4.10 Resultatopsamling | 58 |
| 4.11 Fejlkilder | 60 |

| | |
|---|-----------|
| Kapitel 5 Diskussion | 61 |
| 5.1 Metodediskussion | 61 |
| 5.2 Resultatdiskussion | 62 |
| 5.3 Produktdiskussion | 63 |
| 5.4 Vejledningsdiskussion | 64 |
| Kapitel 6 Konklusion | 65 |
| Litteratur | 67 |
| Bilag A Materialeklassificering | |
| Bilag B Teoretisk kornkurveberegning | |
| Bilag C Standard Proctor | |
| Bilag D Komprimeringsvejledning | |
| Bilag E CPN målinger | |
| Bilag F Faldlodsmålinger | |
| Bilag G Nonlinearitetsberegning | |

Indledning

Infrastrukturelle anlæg er essentielt i et velfungerende samfund. Veje er en vigtig brik i nutidens samfund og udvikling heraf. Vejbygning er naturligvis ikke et nyt påfund, det kan dateres 4 - 5000 år tilbage i tiden til antikken. De første veje bestod udelukkende af større flade sten, indbygget i forbandt. Romerne ændrede med tiden denne praksis og omkring år 300 før vores tidsregning, anlagdes vejene lagvis af grus, i forskellige fraktioner, med store flade sten som topbelægning. I Danmark var vejene stort set kun hjulspor, indtil sidst i 1700 tallet, hvor vejbygningen ændrede karakter. Det skete da skotten MacAdams princip, med skærveopbygning af vejene, vandt indpas overalt i Europa. MacAdam princippet, blev benyttet frem til 1930erne, med tilføjelse af toplagsfyldning med tjære. Vejbygningen ændrede igen herefter praksis, ved opfindelsen af tæppebelægning af færdigblandet asfalt. I 1950erne og 60erne opstod der et kraftigt behov for holdbare veje. Svaret på det var opbygningen af vejkassen, med bundsikringssand til dræning og bærelag af stabilgrus og afslutningsvis et bindelag og slidlag af varmbladet asfalt. Denne opbygning benyttes stadig den dag i dag, hvilket illustreres på figur 1.1. [Asfaltindustrien, 2004]



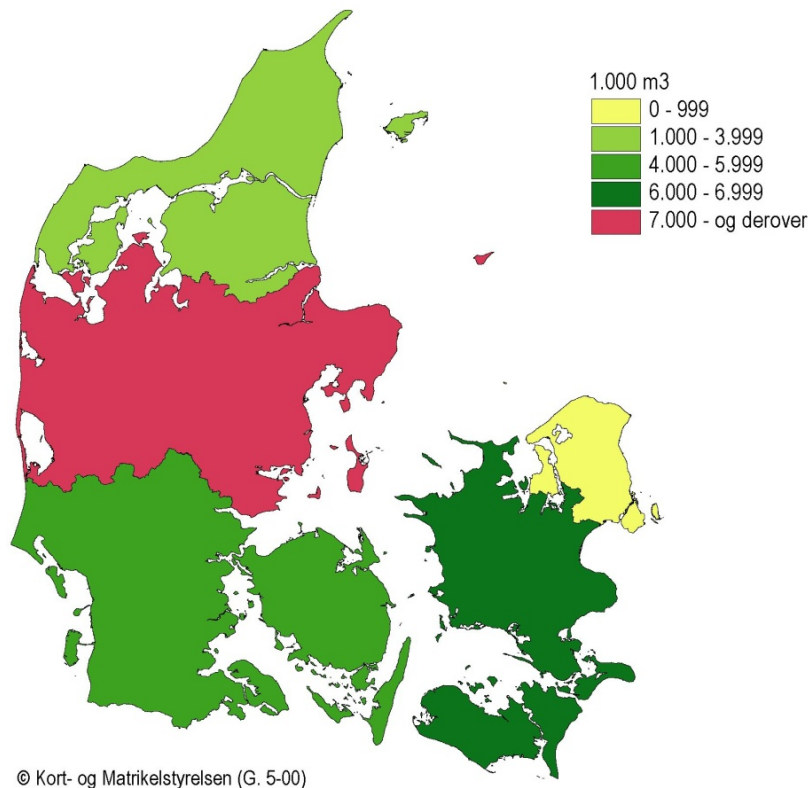
Figur 1.1. Principskitse for vejopbygning i Danmark [Asfaltindustrien, 2004].

Det danske vejnet er blevet kraftigt udbygget over de seneste 50 - 60 år, hvilket har medført et stort forbrug af sand- og grusmaterialer gennem årene, til såvel vejenes opbygning og konstruktion, samt omkringliggende anlæg. Normal praksis er, at vejbygningsmaterialer primært er bestående af bakkematerialer, hvilke der i Danmark er naturligt forekommende reserver af [Vejdirektoratet, 2008].

Indvindingen af sand, grus og stenmaterialer i Danmark er meget varierende, både af mængder og kvalitet. Grunden hertil er at bygge- og anlægsbranchen de seneste år, visse steder i landet, stort set har opbrugt de naturligt forekommende ressourcer af sand, grus og sten. Specielt i Nordsjælland, Nordjylland og på Bornholm, er der mangel på egnede bakkematerialer til vejbyggeri [Vejdirektoratet, 2008], se figur 1.2. Dermed bliver afstandene fra grusgrave, med egnede bakkematerialer, til byggeplads længere og transportarbejdet med produkterne stiger

og produkterne fordyres. Endvidere er den stigende efterspørgsel på egnede materialer medvirkende til at hæve råstofpriserne.

Råstofindvindingen i alt fordelt på regioner



Figur 1.2. Råstofindvinding 2011 [Statestik, 2012].

Storforbrugere af sand, grus og stenmaterialer er anlægsbranchen, hvor specielt vejbyggeri kræver store mængder af råstoffer. Disse er underlagt normer bestemt af EU, således der på et fælles europæisk plan er sikkerhed for, at det materiale som bliver leveret til er i en tilstrækkelig god kvalitet [Vejdirektoratet, 2008].

I og med at egnede vejbygningsmaterialer er en forsvindende ressource i visse landsdele, er der stor gevinst i at anvende alternative materialer eller tilslag til vejbygningsmaterialerne. Et anvendt alternativ til bakkematerialer, til brug i vejbygningsmaterialer, er sand og sten indvundet fra havet (sømaterialer).

Sømaterialer adskiller sig fra bakkematerialer, ved overvejende at være rundkornet. Dette skyldes den naturlige slibning der sker med stenene i havet. Dette gør at sømaterialer ikke umiddelbart er egnede som vejbygningsmateriale i de bærende lag, da erfaringer siger, at rundkornede materialer ikke binder så godt i hinanden som knuste materialer [Vejdirektoratet, 2003c]. Sømaterialer anvendes på trods af dette, i mindre grad i stabilgrus, sammen med bakkematerialer. Stabilgrus inddeles i praksis i to kvaliteter i Danmark (SG I og SG II). I Stabilgrus II godtages eksempelvis op til 70 % uknuste materialer (runde korn) [Vejdirektoratet, 2003a]. Så der er klar basis for og perspektiver i at bruge sømaterialer, som tilslag i stabilgrus til vejbygning.

1.1 Problemstilling

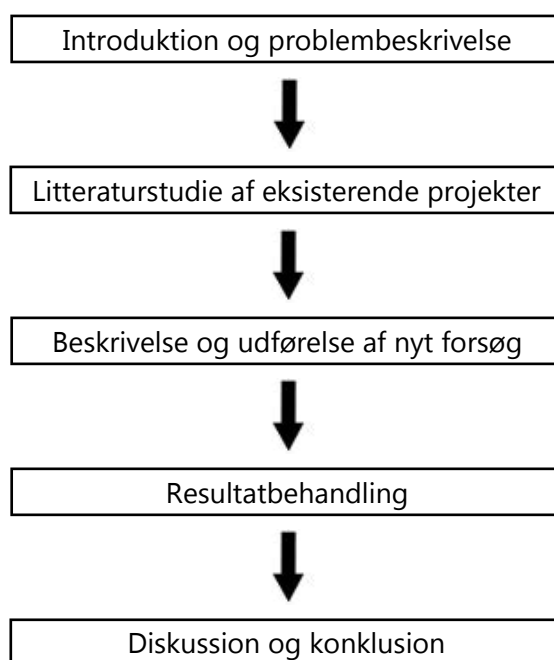
Idet bakkematerialer er en forsvindende ressource, visse steder i Danmark, findes det interessant at se på mulighederne, for større anvendelse af rundkornede materialer i vejbygningsmaterialet stabilgrus II. Problemet med runde materialer er imidlertid at disse ikke har nogen brudflader, hvilken antages at give en ringe komprimerings og bæreevne[Vejdirektoratet, 2003c].

Alligevel accepteres et indhold af uknuste materialer på op til 70% i stabilgrus II. Det tænkes derfor muligt at blande stabilgrus, med forskelligt indhold af rundkornede materialer, som har samme egenskaber, af hensyn til E-modul, som en stabilgrus bestående af bakkematerialer og/eller knuste materialer. Derved fremkommer følgende spørgsmål:

Kan rundkornede materialer benyttes på lige fod med bakkematerialer og knuste materialer i stabilgrus II, i blandingsforhold på op til 70%, som overholder gældende klassificeringskrav og samtidig opfylder de normale dimensioneringsforskrifter for bæreevnen ved indbygning?

Metode

Dette kapitel omhandler metoden for projektet, herunder forudsætninger, antagelser og materialebeskrivelse. For at få en overordnet forståelse af projektet, henvises til følgende flowchart i figur 2.1, som viser opbygningen og arbejdsgangen gennem projektet.



Figur 2.1. Flowchart for rapporten.

2.1 Litteraturstudie

Forud for dette projekt er der udført et litteraturstudie. Dette har til formål, at skabe et overblik over allerede eksisterende litteratur, omkring test på ubundne materialer.

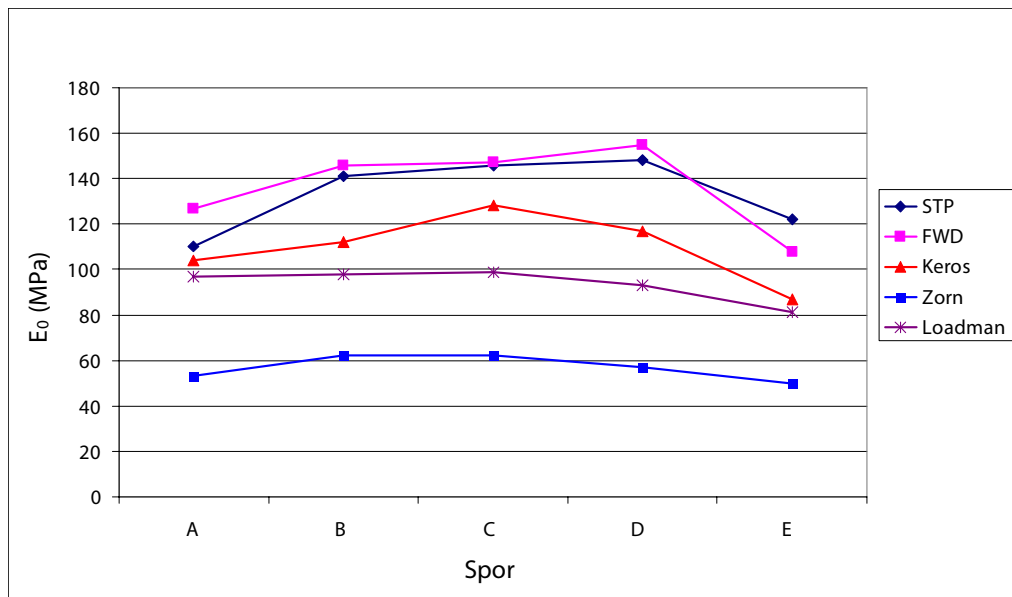
Fælles for den udvalgte litteratur, er at de alle omhandler projekter hvori der anvendes en testkasse til, at teste ubundne materialers egenskaber og styrker ved indbygning. Der er tilsyneladende ingen gennemgående enighed omkring, hvilken fysiske form en testkassen bør have. I ét projekt anvendes en kubisk kasse [Parhamifar, 2011], mens der i andre projekter anvendes rektangulære kasser ([Elhakim et al., 2013] og [Alshibli et al., 2005]). På trods af dette, er konklusionen i alle tre projekter, at det er muligt at indbygge vejbygningsmaterialer i en testkasse, og opnå gode testresultater af de ubundne materialers E-modul.

For at kontrollere materialernes E-modul, anvendes der forskellige metoder i de udvalgte projekter. Med dette menes at der enten anvendes pladebelastning, let faldlod eller begge dele i de enkelte forsøg. Fællesbetegnelsen er dog, at forsøgene er foretaget med samme fremgangsmåde, hvor der først opbygges et bundsikringslag og dernæst et lag af ubundne materialer. Dette giver mulighed for, at undersøge et repræsentativt udsnit af en vejopbygning i hele lagtykkelser.

Yderligere er der i litteraturstudiet gennemlæst danske forskrifter indenfor vejbyggeri. Her konstateredes det hurtigt at Vejdirektoratets litteratur er ideel, da dette giver et dybere indblik i, hvordan danske veje opbygges [Vejdirektoratet, 2013], samt hvilke kontrolmetoder der ligger bag [Vejdirektoratet, 2003a].

Endvidere er der fundet litteratur, vedrørende brugen af let faldlod som kontrol metode for bæreevne. Vejdirektoratet har i den forbindelse udarbejdet en manual, der beskriver, hvordan en korrekt prøvetagning med let faldlod udføres [Vejdirektoratet, 2007]. Samtidig ses det, ud fra flere studier, at der er en vis enighed om, at brugen af let faldlod kan anvendes som prøvningsmetode til E-modul ([Jakobsen, 2007], [Elhakim et al., 2013] og [Hildebrandt, 2005]). Der er dog ét studie der stiller sig kritisk overfor brugen af det lette faldlod og ønsker mere forskning på området [Alshibli et al., 2005]. Det skal hertil siges at der i Danmark anvendes let faldlod, som in situ prøvningsmetode for E-modul [Jakobsen, 2007], men at det bør anvendes sammen med isotopmetoden, som tester komprimeringsgraden af de indbyggede materialer [Vejdirektoratet, 2003c].

Gennem dette projekt anvendes let faldlod til bestemmelse af E-modul. Det findes også andre prøvningsmetoder og apparaturer, som kan anvendes til samme formål. I denne forbindelse har Vejdirektoratet testet forskellige typer udstyr af, for at se om det er muligt at udskifte statisk pladebelastning med let faldlod. På baggrund af disse tests konkluderer Vejdirektoratet at der bør sættes mere på brugen af det lette faldlod, men at det ikke direkte kan bruges til at bestemme komprimeringsgrad, da der ikke kan vises en direkte sammenhæng mellem E-modul og komprimeringsgrad. Endvidere er der ikke større resultatmæssige forskelle på de anvendte typer faldlod i testen, hvormed der ikke fremhæves en producent frem for en anden [Hildebrandt og Baltzer, 2003].



Figur 2.2. Sammenligning mellem statisk pladebelastning og forskellige lette faldlod [Hildebrand og Baltzer, 2003].

På figur 2.2 ses en sammenligning af statisk pladebelastning og forskellige lette faldlod. Betegnelserne er beskrevet i den nedenstående punktopstilling. Apparaterne er testet på lokaliteterne, spor A-E, fra vejdirektoratets egne undersøgelser.

- STP - Statiskpladebelastning
- FWD - Tungt faldlod
- Keros - Let faldlod
- Zorn - Let faldlod
- Loadman - Let faldlod

Aalborg universitet er indehaver af et KEROS PRIMA 100 faldlod, hvilket kan ses resultatmæssigt, ligge nogenlunde i midten af de testede udstyr.

Opsummering

På baggrund af litteraturstudiet vides det nu at:

- Det er muligt at anvende en kasse som prøveform til målinger af ubundne materialer.
- Det er i Danmark anerkendt at anvende let faldlod, som prøvningsmetode til at måle materialers overflade E-modul.
- Det lette faldlod bør anvendes sammen med andre apparater ved kontrol af anlægsarbejder.
- Der er forskel på forskellige apparaturer til måling af overflade E-modul.
- Der ønskes mere forskning på området, med at teste overflade E-moduler ved hjælp af let faldlod.

2.2 Forudsætninger og antagelser

I forbindelse med dette projekt, gennemgås en række forudsætninger og antagelser, som er gjort og er vigtige for forståelsen af forsøgene og resultaterne heraf. Forudsætningerne og antagelserne er fremkommet på baggrund af det gennemgåede litteratur.

2.2.1 Trafikale forudsætninger

For at vælge et udsnit af en vejopbygning, til testopbygningen, som er repræsentativ for en normal vejopbygning i Danmark, anvendes forudsætningerne fra Vejdirektoratets katalogmetode til vejbefæstelsesdimensionering [Vejdirektoratet, 2013]. Heri er oplistet fem trafikklasser, hvortil der knytter sig forskellige belægningsforskrifter. Trafikklasserne er bestemt ud fra det forventede antal lastbiloverkørsler pr. dag, eller et forventede antal "Ækvivalent 10-ton aksel" (Æ10) belastninger pr. dag [Vejdirektoratet, 2013].

Til dette projekt anvendes trafikklasse 4 (T4), se figur 2.3, da denne antages at være svarende til rimelig befærdet dansk hovedvej. Det skal dog tilføjes, at Vejdirektoratet anbefaler at befæstelsen ved mellemstore vejanlæg, dimensioneres efter analytisk-empirisk metode, hvor der anvendes prædefinerede eller brugervalgte trafik- og materialeparametre [Vejdirektoratet, 2013]. Ved denne form for dimensionering, kan der anvendes MMOPP (dimensioneringsprogram). På denne måde indsætter brugeren en række data omkring trafik, jordbund og materiale valg, hvorefter programmet beregner en samlet vejopbygning med veldefinerede lagtykkelser.

I T4 er der forskellige befæstelsesopbygninger, som alle opfylder kravet til den mængde trafik, der ønskes at kunne færdes herpå. Da bærelagenes tykkelser, og dermed styrke, afhænger af det overliggende asfalts styrke, vælges derfor en opbygning med 375 mm. bundsikringslag og 160 mm. stabilt grus [Vejdirektoratet, 2013]. Hvilket er over minimumskravene på 200 mm. bundsikringslag og 150 mm. stabilt grus [Vejdirektoratet, 2013].

| Fleksible belægninger 10 års trafik | | | | | | | |
|-------------------------------------|---|--|--|---|---|--|--------------------------------|
| Trafikklasse | | | | | | | |
| Lastbiler per døgn ¹⁾ | T0 Kun lette køretøjer ³⁾ | T1 | T2 | T3 | T4 | T5 | T6 & T7 |
| Æ10-belastning ²⁾ | | < 1 | 1-75 | 75-150 | 150-600 | 600-1400 | |
| | | 0,5 | 0,5-20 | 20-50 | 50-200 | 200-500 | > 500 |
| Asfalt + SG | 30 mm PA 250/330 120 mm SG ⁵⁾ 150 mm BL ⁵⁾ | 20 mm PA 250/330 50 mm GAB O 70/100 150 mm SG ⁵⁾ 180 mm BL ⁵⁾ | 20 mm PA 250/330 80 mm GAB I 70/100 150 mm SG 250 mm BL | 25 mm PA 250/330 60 mm GAB O 70/100 60 mm GAB I 70/100 150 mm SG 305 mm BL | 25 mm PA 250/330 60 mm GAB O 70/100 90 mm GAB I 70/100 170 mm SG 355 mm BL | 30 mm AB 70/100 60 mm ABB 40/60 65 mm GAB I 40/60 215 mm SG 350 mm BL | Benyt dimensionerings software |
| | | | 25 mm AB 160/220 70mm GAB O 70/100 150 mm SG 255 mm BL | 25 mm AB 160/220 50 mm GAB O 70/100 60 mm GAB I 70/100 150 mm SG 315 mm BL | 30 mm AB 70/100 60 mm GAB O 70/100 75 mm GAB I 70/100 160 mm SG 375 mm BL | 35 mm SMA 40/60 60 mm ABB 40/60 60 mm GAB I 40/60 215 mm SG 350 mm BL | Benyt dimensionerings software |
| | | | 15 mm TB-k 80 mm GAB I 70/100 150 mm SG 255 mm BL | 15 mm TB-k 60 mm GAB O 70/100 60 mm GAB I 70/100 150 mm SG 315 mm BL | 20 mm TB-k 60 mm GAB O 70/100 90 mm GAB I 70/100 170 mm SG 360 mm BL | 20 mm TB-k 65 mm ABB 40/60 75 mm GAB I 40/60 210 mm SG 330 mm BL | Benyt dimensionerings software |

Figur 2.3. Trafikklasser samt opbygning. Markeringen viser den valgte opbygning til dette projekt [Vejdirektoratet, 2013].

En anden opbygning kan også anvendes, men da det er katalogopslag, som bedst muligt passer til den respektive trafikklasse, antages det for værende underordnet, hvilken opbygning der vælges. Endvidere skal det nævnes, at de oplyste lagtykkelser er beregnet på et frosttvivlsomt underlag, hvormed det antages at lagene i kataloget er lettere overdimensioneret. For en mere nøjagtig måling bør der foretages yderligere undersøgelser af jordbunden og den dimensionerende trafik. Derfor antages det, at underbunden i dette tilfælde er frosttvivlsom. Vejdirektoratet angiver en frosttvivlsom underbund til, at have et E-modul på 40MPa [Vejdirektoratet, 2013]. Forud for gældende forsøg, testes underbundens E-modul, så denne kendes til senere brug.

Som beskrevet tages der udgangspunkt i trafikklasse T4. I denne trafikklasse anvendes stabilgrus som ubundet bærelag, hvormed dette, som materiale, beskrives yderligere i det følgende.

2.2.2 Stabilgrus som materiale

Stabilgrus er et materiale, som er behæftet med standarderne DS/EN 13285 [CEN, 2010] og DS/EN 13242+A1 [CEN, 2008]. Disse standarder er med til at sikre kvaliteten af det materiale, som de enkelte grusgrave indvinder til salg. Dette betyder at det leverede materiale, uanset oprindelse, opfylder en række krav, således at en entreprenør kan benytte samme materiale fra forskellige leverandører.

DS/EN 13285 standarden er en fælles europæisk standard, som beskriver ubundne blandinger af vejmaterialer. Efter samtale med Flemming Berg fra Vejdirektoratet, kommer her følgende citat:

„Jeg kan regne ud at I har fundet udbudsforskriften for Stabilt grus på www.vejregler.dk.

Kornkurvevalgene i denne er baseret på den europæiske standard DS/EN 13285 "Unbound mixtures - Specifications", nærmere bestemt Table 6 - Overall grading, hvorfra er valgt kategori G_c.

Kornkurverne i denne er, som i alle europæiske standarder, udtryk for et kompromis som alle europæiske lande i lyset af sine respektive erfaringer har kunnet acceptere.

Men alle kurverne under "Normal graded mixtures" er oprindeligt udsprunget af de såkaldte "fullerkurver", der tilstræber at have en så tæt gradering som muligt - dvs. at flest mulige hulrum er fyldt op af korn. Det gælder også de tidligere danske kornkurver, som de var defineret i DS 401 (der nu er erstattet af DS/EN 13285 - det er et lovkrav at de europæiske medlemslande skal basere materialerne på europæiske standarder hvor sådanne foreligger og tilbagetrække konfliktende nationale standarder).

De kurver I således ser for "Normal graded mixtures" vil således I en dobbeltlogaritmisk afbildning være tilnærmelsesvis rette linjer (fullerkurver). I vores tidligere DS 401 var de helt rette linjer, bortset fra at den øverste kurve mellem nederste og næstnederste sigte var "knækket ned" fra 10% til 9%, se Table 2 "Maximal fines content", kategori UF₉."

Ifølge Flemming Berg er standarden, således udsprunget af nationale erfaringer med ubundne materialer i Europa, hvormed det sikres at de europæiske lande benytter samme standarder/foreskrifter for indbygningsmateriale til vejbygning. Standarden indeholder dermed forskrifter til kornkurver, som de europæiske lande i fællesskab er blevet enige om.

For at imødegå fælles europæiske krav, har Vejdirektoratet således udformet "Almindelig arbejdsbeskrivelse (AAB)" [Vejdirektoratet, 2003a] og "Vejledning" for stabilgrus [Vejdirektoratet, 2003c]. Dette er nationale beskrivelser, som lægger sig op ad de europæiske standarder. Heri indgår bl.a. beskrivelser til materiale, levering, komprimering og generel kontrol. AAB og Vejledningen for stabilgrus vil derfor indgå, som vigtige dele af dette projekt, da de ønskede forsøgsblandinger, med forskelligt indhold af rundkornede materialer, skal fremstilles efter de forskrifter, som er angivet i begge kataloger.

Stabilgrus klassificeres i to kvaliteter, SG I og SG II. Fælles for begge typer, er at de skal være stærke, vejrbestandige og være sammensat af naturlige materialer. Yderligere må grusene ikke indeholde skadelige andele af organiske materialer, samt muld, silt- og lerklumper [Vejdirektoratet, 2003a]. De to stabilgrustyper er beskrevet i de nedenstående afsnit, ud fra klassificeringsforskrifterne fra DS/EN 13285.

DS/EN 13242+A1 standarden omhandler tilsætning af tilslagsstoffer til ubundne materialer. Endvidere beskrives der heri at der må anvendes op til 70% rundkornede materialer i en

stabilgrus type II [CEN, 2008].

På følgende tabel 2.1 er Vejdirektoratets materialeparametre for ubundne vejbygningsmaterialer oplistet. Disse tager udgangspunkt i de amerikanske AASHO forsøg tilbage i 50'erne og 60'erne, hvor en testvej blev overkørt med tunge lastbiler indtil vejen var total nedbrudt. Herefter kunne materialernes E-modul fastlægges ved hjælp af empiriske undersøgelser [NCC, 2001]. Materiale E-modulet udtrykker dermed den styrke, som det forventes et givent materiale har i beregningssammenhænge.

| Materiale | E-Modul [MPa] | Minimumstykkelse [mm] |
|--|---------------|-----------------------|
| Stabilgrus I (SG I) | 350 | 150 |
| Stabilgrus II (SG II) | 300 | 150 |
| Bundsikringslag, sand, kvalitet I (BL I), $U > 3$ | 150 | 200 |
| Bundsikringslag, sand, kvalitet I (BL I), $U \leq 3$ | 100 | 200 |
| Bundsikringslag, sand, kvalitet II (BL II), $U > 3$ | 150 | 200 |
| Bundsikringslag, sand, kvalitet II (BL II), $U \leq 3$ | 100 | 200 |

Tabel 2.1. Vejdirektoratets materialeparametre [Vejdirektoratet, 2013].

Som det ses i tabel 2.1 er der en række krav til de forskellige materialer. I dette projekt lægges der, som tidligere nævnt, primært fokus på stabilgrus, som er beskrevet i det følgende. Bundsikringslaget beskrives derfor perifært og kun med henvisning til, at ovenstående krav samt gældende normer er overholdt.

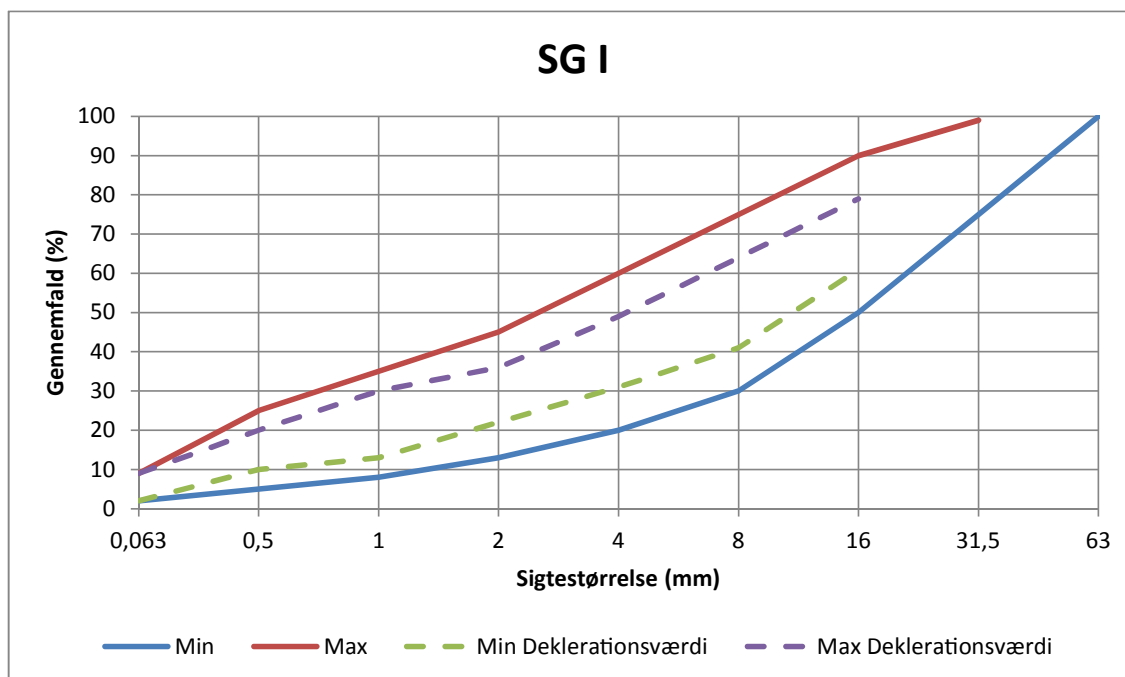
2.2.3 Stabilgrus I

Graderingen af SG I (0/31,5) skal ligge inden for værdierne i tabel 2.2. Yderligere skal sandækvivalenten være mindst 34 og indholdet af runde korn må max være 50 %.

| SG I | | | | | |
|----------|--------------|-----|---------------------|-----|-----------|
| Sigte mm | Gennemfald % | | Deklerationsværdier | | Tolerance |
| | Min | Max | Min | Max | |
| | 63 | 100 | - | | |
| 31,5 | 75 | 99 | | | |
| 16 | 50 | 90 | 61 | 79 | +/- 11 |
| 8 | 30 | 75 | 41 | 64 | +/- 11 |
| 4 | 20 | 60 | 31 | 49 | +/- 11 |
| 2 | 13 | 45 | 22 | 36 | +/- 9 |
| 1 | 8 | 35 | 13 | 30 | +/- 5 |
| 0,5 | 5 | 25 | 10 | 20 | +/- 5 |
| 0,063 | 2 | 9 | 2 | 9 | |

Tabel 2.2. Graderingstabel for stabilgrus I.

Graderingsværdier samt deklarationsværdier fra tabel 2.2, er illustreret på figur 2.4. Tolerancen er den tilladte afvigelse fra deklarationsværdierne [Vejdirektoratet, 2003a].



Figur 2.4. Stabilgrus I.

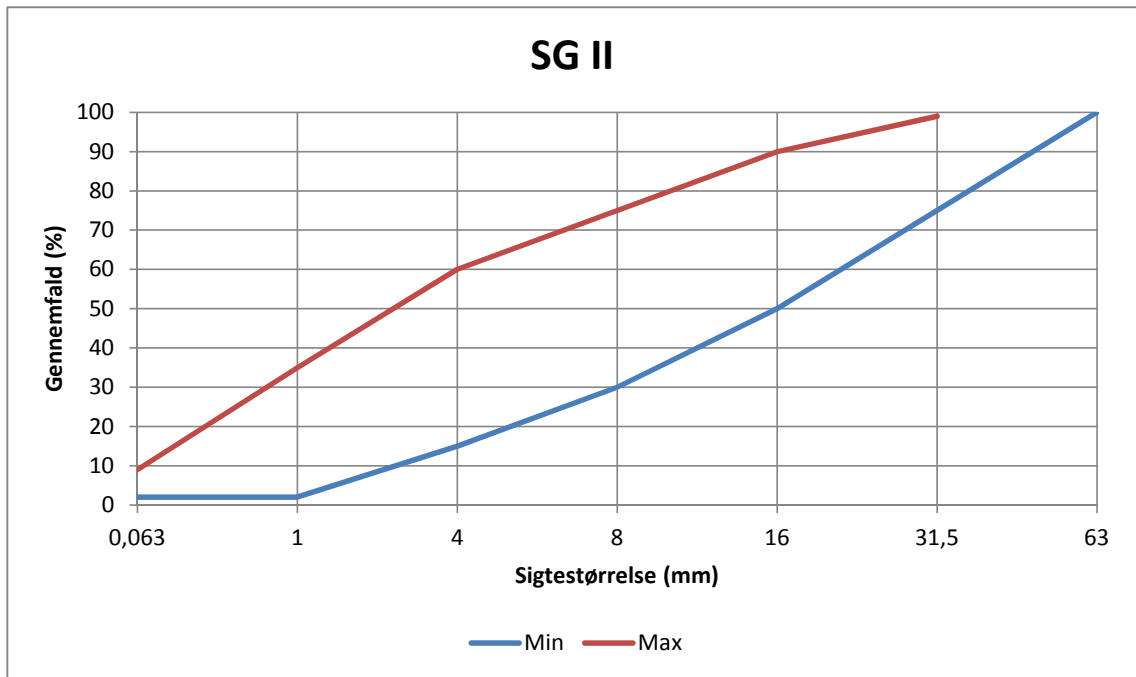
2.2.4 Stabilgrus II

Graderingen af SG II (0/31,5) skal ligge inden for værdierne i tabel 2.3. Yderligere skal sandækvivalenten være mindst 30 og indholdet af runde korn må max være 70 %.

| SG II | | | |
|----------|--------------|-----|---------------------|
| Sigte mm | Gennemfald % | | Deklerationsværdier |
| | Min | Max | |
| 63 | 100 | - | Ingen krav |
| 31,5 | 75 | 99 | |
| 16 | 50 | 90 | |
| 8 | 30 | 75 | |
| 4 | 15 | 60 | |
| 1 | 2 | 35 | |
| 0,063 | 2 | 9 | |

Tabel 2.3. Graderingstabel for stabilgrus II.

Graderingsværdier fra tabel 2.3, er illustreret på figur 2.5.



Figur 2.5. Stabilgrus II.

Projektet afgrænses til at omhandle stabilgrus II, da det antages at denne type stabilgrus, i forhold til de få krav der er til denne, er den mest anvendte indenfor vejbyggeri. Samtidig er der ikke nogen deklarationsværdier (skærpede krav til kornkurve) tilhørende denne type stabilgrus [Vejdirektoratet, 2003a].

Forsøg

I dette kapitel beskrives de enkelte laboratorieforsøg, som udføres på både råmaterialer og færdigblandet stabilgrus. Efterfølgende beskrives forsøgsopstillingen og fremgangsmåden for forsøgene i prøvemarken med de færdige produkter, samt det udstyr, der anvendes i forbindelse hermed.

3.1 Materialeklassificering

I dette afsnit, beskrives laboratorieforsøgene, som går forud for de forsøg, som foretages i prøvemarken. Disse forsøg er med til at vise, om de færdigblandede produkter lever op til gældende normer og krav.

Til projektet anvendes materialer fra KROGHS A/S grusgrav i Bradsted i Nordjylland, samt søpladsen i Thyborøn. De materialer som anvendes, er af forskellige fraktioner. Fraktionerne blandes herefter, så de overholder de forskrifter der er for stabilgrus. Der laves et antal blandinger, hvor andelen af runde korn går fra 0-70 %.

På tabel 3.1 vises de forskellige sand- og grusfraktioner, som anvendes i forbindelse med blandingen af de forskellige stabilgrustyper. Ved observation af de leverede materialer, ses det at de knuste materialer overvejende inderholder flint men også granit, mens de rundkornede materialer indeholder granit, flint og gnejs. Endvidere indeholder grusgravsmaterialerne jiggede sten, hvilket vil sige de er sorteret efter densitet og derefter nedknust. De bedste materialer anvendes i betonproduktion. Dette betyder at det udleverede materialer til projektet, består af "de letteste" sten fra stenknusningsprocessen.

| Materialer | | |
|------------|-------|---------------|
| Knust | Rund | Sand |
| 0/4* | 1/4 | 0/5 Fyldsand |
| 2/8 | 4/8 | Bundsikring** |
| 8/11 | 8/16 | |
| 11/16 | 16/28 | |
| 16/24 | | |

Tabel 3.1. Materiale størrelser. * 0/4, stenmel fra knusning, ** Bundsikring, genbrug fra prøvemarken.

3.1.1 Sigteanalyse

I forbindelse med materialeklassificeringen er der foretaget sigteanalyser for hver fraktion af sten og grus. Dette gøres for at bestemme kornfordeling af de leverede materialer.

I alt er der leveret 10 forskellige fraktioner af sand og sten, fordelt over både knuste og runde materialer, som vist i tabel 3.1. De knuste materialer kommer fra en grusgrav ved Bradsted i Nordjylland, mens de runde materialer (søral fra Nordsøen) er landet i Thyborøn i Vestjylland.

For hver fraktion udtages en minimums prøvestørrelse. Prøvestørrelsernes vægt afhænger af materialets størrelse, hvormed de udtagne prøvers vægt strækker sig fra 150g - 10kg. For ikke at ødelægge sigterne, neddeles prøverne til mindre portioner, som sigtes hver for sig.



Figur 3.1. Stenmaterialer ved prøvefeltet.

De udtagne vådprøver, vejes af og sættes derefter i en 105 grader varm ovn i 24 timer, således alt vand er fordampet fra materialerne. Herefter vejes de tørrede materialer af og sigtes på sigtemaskine. Alle materialer over 16 mm. sigtes fra manuelt ved grovsigtning og herefter finsigtes resten i sigtemaskine.

Den samlede vægt af materiale på hver sigte blev noteres, hvorefter der kan optegnes en kornkurve for hver prøve. Resultaterne fra sigteanalysen bruges senere til beregning af de forskellige stabilgrus blandinger.

Sigteanalysen er foretaget i henhold til gældende normer for sigtning af materialer til vejbygning [CEN, 2013].

I forbindelse med sigtningen af bundsikringen, er der foretaget en beregning af uensformighedstallet (U-tallet). U-tallet bestemmes ud fra sigtekurven, som forholdet mellem maskevidderne ved 60 % og 10 % gennemfald og beregnes efter følgende ligning 3.1.

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (3.1)$$

Hvor:

- U = Uensformighedstal [-]
- d_{60} = 60 % fraktil
- d_{10} = 10 % fraktil

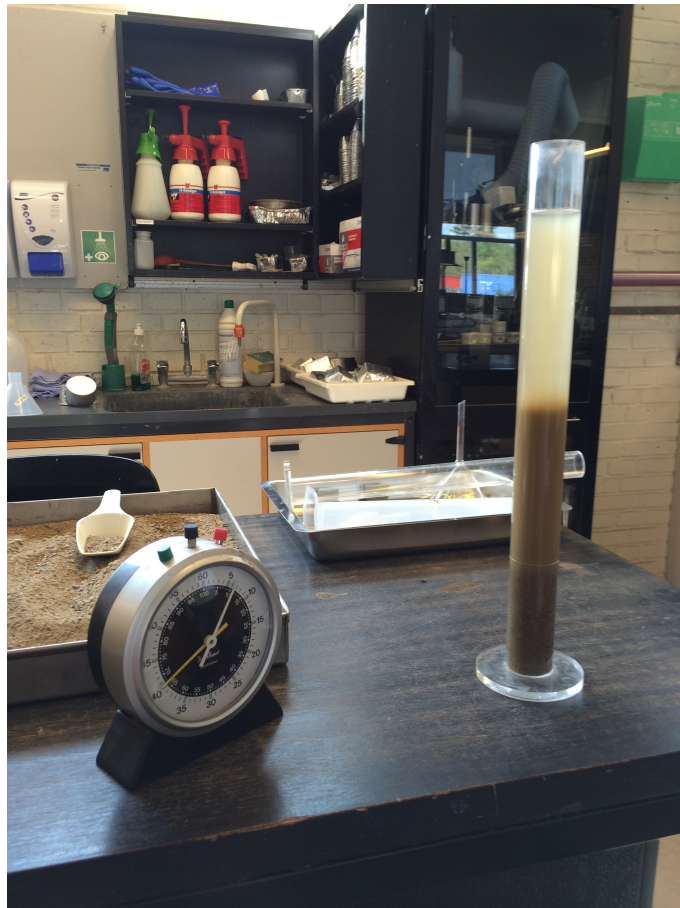
Utallet viser hvor godt et materiale er graderet/sorteret. Således vil et højt U-tal angive en god gradering, mens et lavt U-tal vil angive et velsorteret materiale. Visuelt kan dette også ses på kornkurven for et materiale, hvor en stejl kornkurve vil give et velsorteret materiale, mens en flad kornkurve vil give et velgraderet materiale [Ovesen et al., 2009].

Beregningen af U-tallet er gjort i henhold til Vejdirektoratets materialeparametre, som kan ses i tabel 2.1 på side 11. Disse forudsætninger siger at en bundsikring med $U > 3$, bør kunne holde et E-modul på minimum 150 MPa [Vejdirektoratet, 2013].

3.1.2 Sandækivalent

Som en del af laboratorieundersøgelserne for de forskellige materialer, udføres test af sandækivalent (SE). Dette gøres for at bestemme et materiales indhold af fine bestanddele i forhold til sandindhold. Der udføres test på 0/4 fraktionerne.

Inden disse tests, udtages en prøve af de færdige stabilgrusblandinger, som vejes af og sættes til tørring i ovn. Herefter vejes det tørrede materiale af igen og der kan udregnes en vandprocent. Derefter sigtes materialet og alle fraktioner fra 4 mm. og ned, tages fra og anvendes til undersøgelse.



Figur 3.2. Måling af sandækivalent.

Analysen er foretaget i henhold til gældende standard [CEN, 2012], som angiver at SE skal være min. 30 for SGII.

3.1.3 Optimalt vandindhold

Det optimale vandindhold i materialerne er vigtigt at kende, idet dette viser, hvor meget vand der kan tilføjes materialet førend det bliver plastisk og derved får en svækket bæreevne. Med andre ord, giver det optimale vandindhold i et materiale, den bedste komprimering ved indbygning og derved den bedste bæreevne.



Figur 3.3. Proctor apparat.

Vandindholdet bestemmes ved standard proctor forsøg. Heri testes først bundsikringssandet og dernæst de færdigblandede stabilgrustyper. Det skal i denne forbindelse siges, at Vejdirektoratet anbefaler at der anvendes vibrationsbord til bestemmelse af vandindhold, idet proctorrapparatets hammerpåvirkning ikke er velegnet til at komprimere stabilgruset. Da Aalborg universitet ikke ligger inde med vibrationsbord, anvendes standard proctor.



Figur 3.4. Mixer til omrøring af blandinger. På vægten ses bundsikringen og i spanden ved siden af ses en blanding af stabilgrus.

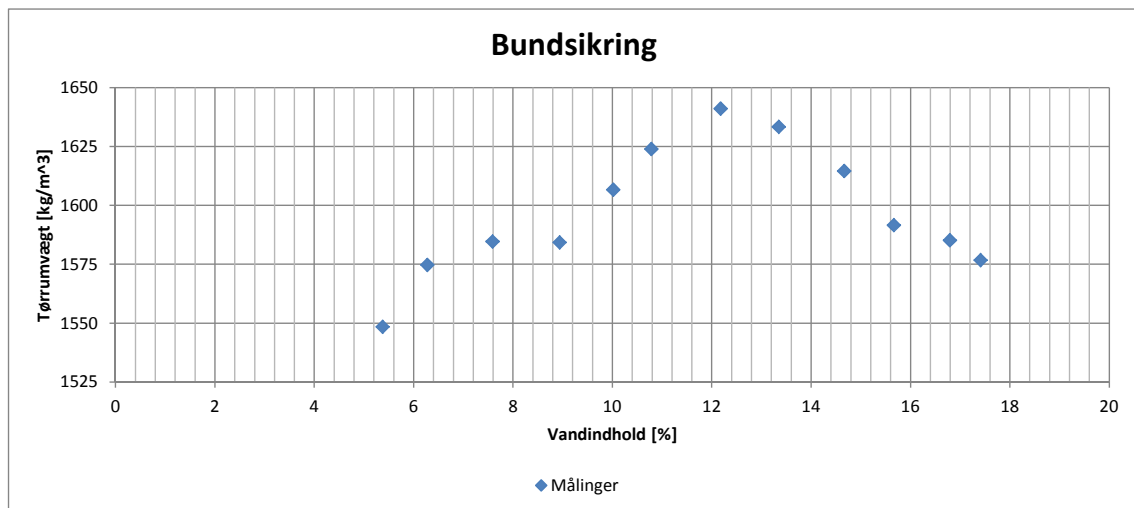
Forud for proctor forsøget udtages prøver af både bundsikringen og det færdigblandede stabilgrus. Hver enkelt blanding mixes, se figur 3.4, for at skabe et homogent materiale som derefter indbygges i proctorformen, som i henhold til gældende norm er af type A [CEN, 2011]. Mellem hver prøvetagning øges vandindholdet med 1%. Der forsættes med at øge vandindholdet med 1%, indtil grænsen for det optimale vandindhold i prøvematerialet er overskredet. Dette medfører ofte, at materialet når flydegrænsen og får en plastisk konsistens, inden forsøget afsluttes. For at få en repræsentativ prøve, udtages prøven 1/3 nede i formen, hvor den forsigtigt udtages uden at presse vandet ud af materialet og derefter lægges i en bakke, som vejes af inden tørring.

På figur 3.5 ses en proctor prøve med højt vandindhold, hvor prøveformens indhold er adskilt inden prøvetagningen. Det overskydende materiale skrubes af, hvorefter prøven til vandindholdsbestemmelse kan udtages. Endvidere ses tydeligt at denne prøve har overskredet det optimale vandindhold, idet materialet meget plastisk. Hver fugtig prøve sættes herefter i ovn ved 105 grader og tørres i 24 timer, hvorefter der vandindholdet og tørdensiteten udregnes. Herefter kan det optimale vandindhold bestemmes, ud fra den maksimale tørdensitet.



Figur 3.5. Våd prøve i proctor form inden prøvetagning.

Ved beregning af det optimale vandindhold, kan der optegnes et plot af vandindholdet vs. tørdensiteten, som er vist på figur 3.6. Dette illustrerer ved hvilket vandindhold, den maksimale tørdensitet kan forventes og derved den maksimale komprimeringsgrad ved indbygning af materialet.



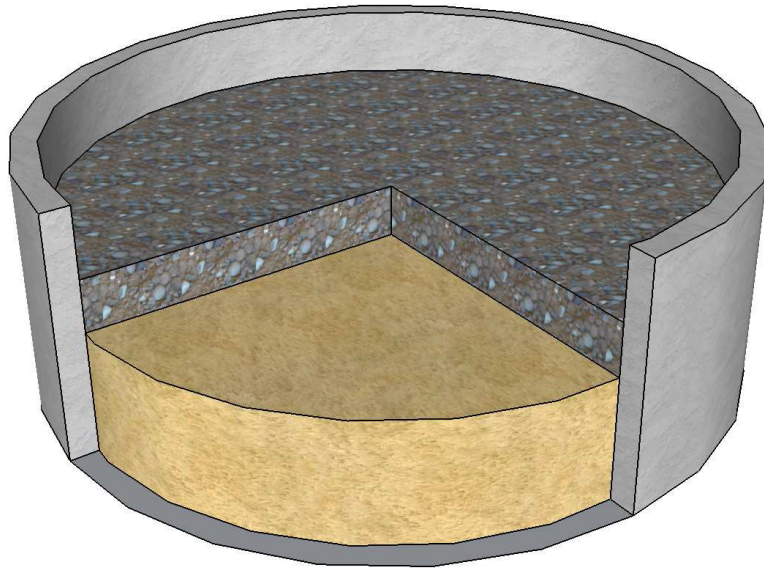
Figur 3.6. Eksempel på standard proctor for bundsikringsandet.

Af figur 3.6 ses, at det optimale vandindhold for materialet ligger lidt over 12%.

Det optimale vandindhold ved indbygning, bør ligge 0-3% under det optimale vandindhold ved proctor [Vejdirektoratet, 2003a], for at opnå maksimal komprimering af materialet i praksis. Alle målinger er foretaget med hensyn til gældende standard [CEN, 2011].

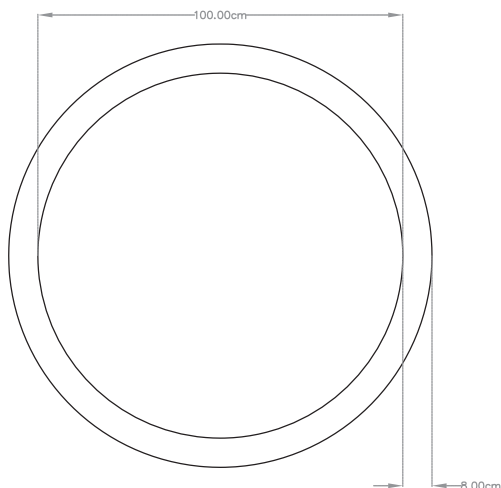
3.2 Prøveopstilling

Prøveopstillingen er bestående af tre betonringe Ø100 cm., med en højde på 25 cm. hver. Betonringene er placeret i et afgravet prøvelfelt, på en fast underbund af kridt, som i dette tilfælde antages for frosttvivlsom. Prøveopstillingen er placeret, således siderne er så lodrette som muligt. Derved kan der optegnes målestreger på indvendig side af brøndringen, som guidelinjer ved indbygning af bundsikringssand og stabilgrus, således det sikres at lagtykkelserne er identiske mellem hver forsøgsblanding. På figur 3.7 er prøveopstillingen illustreret.

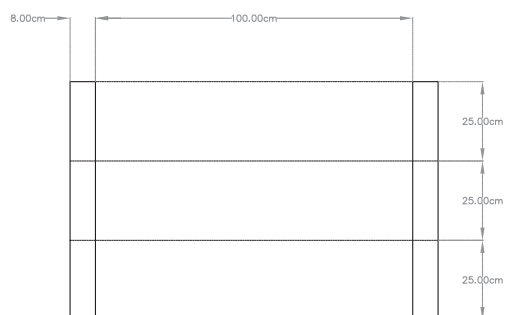


Figur 3.7. Illustration af prøvesopstilling.

Der anvendes betonringe, da det antages at ringformen, egner sig bedre til denne type test end en kubisk kasse. Antagelsen bygger på, at det tænkes svært at komprimere materialet i hjørnerne af en kasse, hvormed svage punkter tænkes at have indvirkning på testresultaterne. På figurerne 3.8 og 3.9 vises dimensionerne af prøveopstillingen.



Figur 3.8. Diameter og godstykkelse.



Figur 3.9. Betonringenes højde.

Prøveopstillingen er sat i et allerede eksisterende prøvefelt på Aalborg universitet, hvorfra den eksisterende underbund af kridt og bundsikringssand kan benyttes. Prøveopstillingen er sat på et lag af retter sand, så den står forholdsvis plant. Placeringen af prøveopstillingen i prøvefeltet ses på figur 3.10.



Figur 3.10. Forsøgsopstilling i prøvefelt.

Med dimensionerne af prøveopstillingen på plads, kan der nu udføres forsøg heri. I det følgende beskrives forsøgene, samt måden der indbygges materialer og hvordan der måles i prøveopstillingen.

3.3 Forsøgsbeskrivelse

Det er ønsket at teste forskelligt indhold af rundkornede materialers indvirkning på bæreevnen for stabilgrus. Der vælges at fremstille fire forskellige blandinger, med forskelligt indhold af rundkornet materiale. De forskellige stabilgrusblandinger, skal alle overholde de gængse krav for stabilgrus II. Jævnfør AAB for stabilgrus samt gældende standard, må indholdet af rundkornede materialer i stabilgrus II, variere fra 0 - 70 % af den samlede mængde grus [Vejdirektoratet, 2003a] og [CEN, 2008]. For at sikre højest mulig andel af totalt rundkornet materiale, vælges søsten som repræsentant for rundkornede materialer. Af logistiske årsager vælges, at alle ikke-rundkornede materialer er knuste bakkesten og bakkesand. Forskellen på søsten og knuste bakkesten er illustreret på figur 3.11.



Figur 3.11. Illustration af hhv. knuste bakkesten og søsten.

For at sikre at stabilgrusblandingerne, som udgangspunkt kan overholde kravene til kornkurverne for stabilgrus II, er der udført materialespecifikationer og kornkurver for samtlige tilslagsmaterialer i stabilgruset ved forsøg i laboratoriet, hvilke kan ses på bilag A.

De forskellige sand- og stenmaterialer, se tabel 3.1, blandes i fire blandingsforhold, med følgende indhold af rundkornede materialer:

- 0 %
- 20 %
- 40 %
- 70 %

Der bestemmes teoretiske blandingsforhold for de forskellige stabilgrusblandinger, så velgraderet som muligt, ud fra de enkelte materialers kornfordeling, se bilag B. Der blandes 250 kg. af hver stabilgrusblanding, således der er grus nok til såvel indbygning i testform som laboratorieforsøg. Stabilgrusblandingerne blandes i en tvangsblender. Der udføres sigteanalyse, sandækvivalent måling og standard proctor forsøg (optimalt vandindhold). Når blandingen lever op til kravene for stabilgrus II, kan det indbygges efter nedenstående fremgangsmåde.

I det følgende beskrives arbejdsgangen for hver indbygning. Arbejdsgangen består af fire hovedpunkter, som delvist repeteres ved udskiftning af testmateriale.

3.4 Forsøgsfremgangsmåde

I det følgende beskrives forsøgsfremgangsmåden. Fremgangsmåden beskriver i trin, hvordan der indbygges materialer i prøveopstillingen og hvordan der måles på de enkelte lag i opbygningen.

3.4.1 Indbygning af bundsikringslag

- Vandindholdet i bundsikringenssandet bringes op på optimalt niveau, ved omrøring af bundsikringssandet i betonblander og tilsætning af vand.
- Bundsikringssandet udlægges i prøveopstillingen, i en afrettet tykkelse på ca. 10 cm.
- Der komprimeres med fem overkørsler, jævnfør tabel D.1 i bilag C og efter fremgangsmåden illustreret på figur 3.12 og 3.13.
- Der udlægges endnu ca. 10 cm. afrettet bundsikring.
- Der komprimeres igen med fem overkørsler.
- Der udlægges endnu ca. 10 cm. afrettet bundsikring.
- Der komprimeres igen med fem overkørsler.
- Der udlægges endnu ca. 10 cm. afrettet bundsikring.
- Der komprimeres igen med fem overkørsler.
- Der udlægges ekstra bundsikring, hvis den samlede tykkelse ikke opfylder de forudsatte 37,5 cm. Eller der afgraves forsigtigt, uden af ødelægge komprimeringen, hvis tykkelsen af laget er over 37,5 cm.

3.4.2 Delkontrol af bundsikringslag

- Komprimeringsgraden af det indbyggede materiale kontrolleres med CPN isotopsonde. Der foretages fem målinger i en dybde på 20 cm., i mønsteret illustreret på figur 3.14.
- Overfladebæreevnen af det indbyggede bundsikringssand måles med let faldlod i centrum af testformen, hvilket er illustreret på figur 3.15.
- Der udføres målinger med to forskellige faldhøjder med det lette faldlod, med en pladediameter på 30 cm.
- Resultaterne fra faldlodsmålingerne noteres.

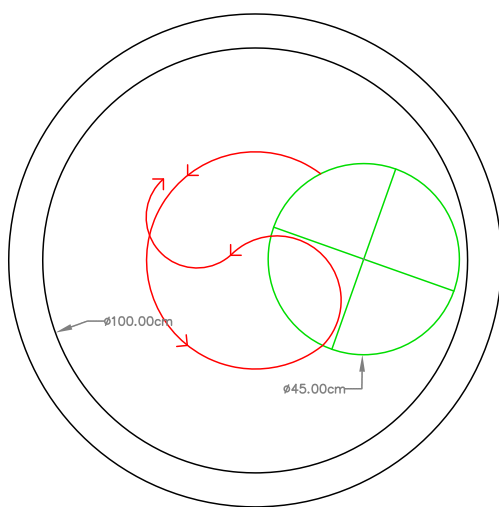
3.4.3 Indbygning af stabilgrus

- Vandindholdet i stabilgruset bringes op på optimalt niveau, ved omrøring af stabilgruset i betonblander og tilsætning af vand.
- Stabilgruset udlægges i en afrettet tykkelse på ca. 7 cm.
- Der komprimeres med fem overkørsler, jævnfør tabel D.1 i D og efter fremgangsmåden illustreret på figur 3.12 og 3.13.
- Der udlægges yderligere ca. 7 cm. afrettet stabilgrus.
- Der komprimeres igen med fem overkørsler.
- Der udlægges yderligere ca. 7 cm. afrettet stabilgrus.
- Der komprimeres igen med fem overkørsler.
- Det kontrolleres at den samlede tykkelse af stabilgruset overholder de forudsatte 16 cm. Hvis tykkelsen af laget ikke svarer til de forudsatte 16 cm., tilføjes ekstra materiale og komprimeres, eller det ekstra grus afgraves forsigtigt.

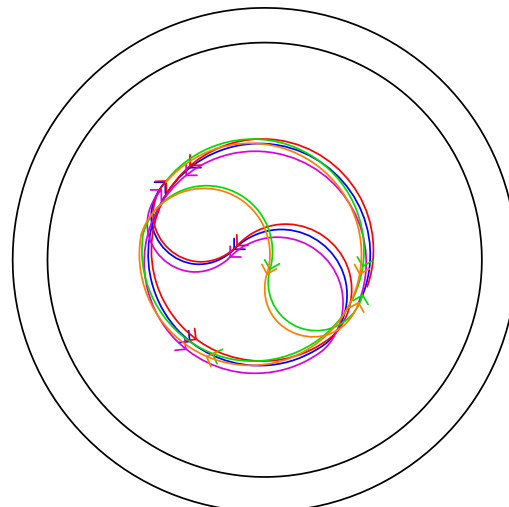
3.4.4 Måling af E-modul på overflade af stabilgrus

- Komprimeringsgraden af det indbyggede materiale kontrolleres med CPN isotopsonde. Der udføres fem målinger i en dybde på 10 cm., efter mønsteret illustreret på figur 3.14.
- Overfladen af det færdigindbyggede stabilgrus måles med let faldlod i centrum af testform, som illustreret på figur 3.15.
- Der udføres faldlodsmålinger fra to forskellige faldhøjder, med en pladediameter på 20 cm.
- Overfladestivheden noteres og forsøget er derefter fuldendt.

Del 3 (indbygning af stabilgrus) og 4 (måling af E-modul på overflade af stabilgrus) gentages med ny stabilgrusblanding. Under forudsætning af at det indbyggede bundsikrings-sand, er af samme beskaffenhed som før indbygning af den forrige stabilgrus.

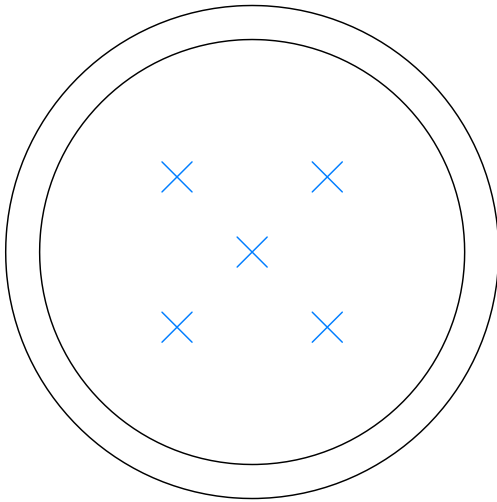


Figur 3.12. Komprimeringsmønster i testform.

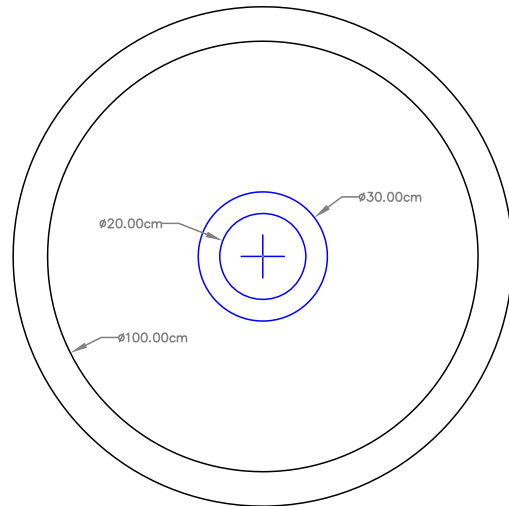


Figur 3.13. Overkørselsmønster for fem overkørsler.

Den grønne kontur på figur 3.12 er en illustration af en pladevibrator. Den røde kontur på figur 3.12 er overkørselsmønsteret i forbindelse med komprimering i testformen. Komprimeringsmønsteret gentages i alt fem gange, således hvert punkt i testformen er overkørt fem gange, som illustreret på figur 3.13.



Figur 3.14. Målepunkter for CPN i testform.



Figur 3.15. Placering af faldlod i testform.

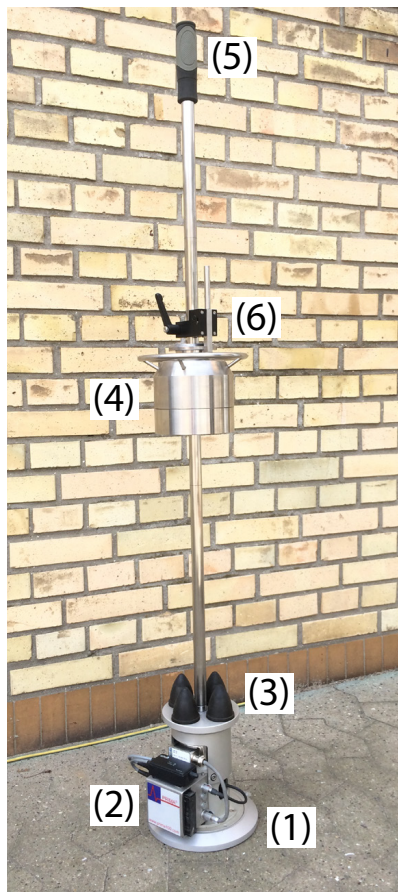
De blå kryds på figur 3.14 er en illustration af CPN målerens målepunkter i testformen. De blå konturer på figur 3.15 er en illustration af det lette faldlods placering og to forskellige pladestørrelser, hhv. Ø20 cm. og Ø30 cm.

3.5 Udstyr

I dette afsnit beskrives det udstyr, som anvendes gennem projektet. Hvert stykke udstyr beskrives kortfattet, således der skabes en forståelse af udstyrets formåen og egenskaber.

3.5.1 Let faldlod

Det lette faldlod (minifaldlod) er et apparat, som bruges til at fastsætte et materiales E-modul [Hildebrant, 2005]. Traditionelt er E-modulet fundet ved hjælp af pladebelastningsforsøg, men idet denne teknik er forholdsvis tidskrævende og at der skal anvendes en stor modvægt på prøvebordet, er det derfor nemmere at anvende minifaldlod. I modsætning hertil giver minifaldloddet et E-modul hver gang loddet falder. Endvidere er faldloddet nemt at transportere og betjene, hvormed dets anvendelse i felten nærmest er uovertruffen. På figur 3.16 ses faldloddet og dets bestanddele.



- (1) Bundplade
- (2) Geofon
- (3) Stødbuffer
- (4) Lod
- (5) Styrestang
- (6) Udløser

Figur 3.16. Let faldlod.

Faldloddet fungerer på den måde at loddet slippes fra en fast eller variabel faldhøjde, hvormed det i kontakten med stødbufferne sender vibrationer i jorden, som en geofon i bunden af udstyret registrerer. Ved hjælp af en PDA kan målingerne aflæses og samtidig lagres til senere databehandling. Ved hjælp af pladetrykket og deflektionen (nedsynkningen) i materialet udregnes E-modulet [Vejdirektoratet, 2007]. Apparatet udregner E-modulet ud fra følgende formel 3.2.

$$E_0 = \frac{f \times (1 - \nu^2) \times \sigma_0 \times a}{d_0} \quad (3.2)$$

Hvor:

- E_0 = Elasticitetsmodul [MPa]
- f = Spændingsfordelingsfaktor [-]
- ν = Poissons forhold [-]
- σ_0 = Pladetryk [MPa eller kN/m^2]
- a = Pladeradius [m]
- d_0 = nedsynkning [m]

For målinger af E-modulet på underbunden bruges betegnelsen E_0 , efterfulgt af pladetrykket i kPa. Med det menes, at et pladetryk på underbunden på 100 kPa benævnes $E_{0,100}$ [Vejdirektoratet, 2007]. Poissons forhold ν kan sættes til 0,5 hvis ikke andet er oplyst omkring materialet der måles på. For grus og sten materialer anvendes hovedsageligt en ν på 0,35. I dette tilfælde anvendes ν 0,5 på underbunden, mens der på de øvrige lag anvendes ν 0,35.

3.5.2 CPN isotopsonde

For at måle komprimeringsgraden af de indbyggede materialer, anvendes en CPN (Troxler). Udstyret fungerer på den måde, at en radioaktiv sonde sendes ned i en given dybde i det materiale, som der ønskes testet komprimeringsgrad på. Under kørsel modtager sonden således isotoper fra den radioaktive kilde, hvorefter apparatet kan udregne våddensitet og tørdensitet af sit materiale. Ved at sammenligne resultaterne fra CPN målingerne med proctor målingerne, kan komprimeringsgraden findes [InstroTek, 2013]. Reference tørdensiteten bør dog findes ved hjælp af vibrationsindstampningsmetoden [Vejdirektoratet, 2003a]. Det er dog ikke tilgængeligt på AAU, hvorfor der i stedet benyttes Standard Proctor. De fundne proctorværdier fra forsøgene kan indsættes i CPN'en, hvorefter der bl.a. gives en komprimeringsgrad.



Figur 3.17. CPN isotopsonde i testform.

Forud for målingerne er det dog vigtigt at der kalibreres for baggrundsstøj, samt at der indsættes en korrekt proctor referenceværdi således apparatet giver retvisende resultater.

For at kontrollere at komprimeringen af et materiale er optimal, måles der i fem punkter, i hver opbygning af både bundsikringslag og stabilgrus, jævnfør komprimeringskrav fra Vejdirektoratets AAB [Vejdirektoratet, 2003a]. Herunder skal den gennemsnitlige komprimeringsgrad for både bundsikringsand og stabilgrus ligge over 95% og ingen målinger under 92% [Vejdirektoratet, 2003a].

Komprimeringsgraden af de minimalt tilladte fem målinger, skal bestemmes ved statistisk bedømmelse [Vejdirektoratet, 2003a]. Komprimeringskravet anses for opfyldt, ved at ulighed 3.3 er tilfredsstillet [Vejdirektoratet, 2003a]:

$$g - k \times s \geq K \tag{3.3}$$

Hvor:

$K = 92\%$

$g =$ gennemsnit, $\sum x/n$

$s =$ standardafvigelsen $\sqrt{\sum(x - g)^2/(n - 1)}$

$x =$ enkeltmålingerne

$n =$ antallet af målinger, minimum 5

$k =$ en konstant fra tabel 3.2

| | | | | | | | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| n | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 40 | 50 |
| k | 1,96 | 1,86 | 1,79 | 1,74 | 1,70 | 1,67 | 1,58 | 1,53 | 1,50 | 1,47 | 1,44 | 1,43 |

Tabel 3.2. konstanter ved statistisk bestemmelse af komprimering [Vejdirektoratet, 2003a].

3.5.3 Pladevibrator

I forbindelse med dette projekt anvendes en pladevibrator til komprimering af bundsikrings-sand og stabilgrusblandingerne. Idet prøvefeltet er rundt, anvendes en rund pladevibrator, som har følgende specifikationer, se tabel 3.19. Med en rund pladevibrator antages det, at der ikke bliver svagt komprimerede punkter langs betonringenes kant, da pladevibratoren kan komprimere helt ud til kanten.



Figur 3.18. Pladevibrator til forsøg.

| | |
|------------------|---------------|
| Navn | Tremix KMR-11 |
| Drivmiddel | Benzin |
| Diameter | 45 cm |
| Centripetalkraft | 16kN |
| Vægt | 93 kg |

Figur 3.19. Specifikationer for vibrator.

Komprimeringen af materialerne i prøveopstillingen, i forhold til lagtykkelser og antal overkørsler, udføres efter skemaet i figur D.1 i bilag D.

På baggrund af materialeklassifikationen, gennemgangen af fremgangsmåden for forsøgene samt beskrivelse af det anvendte udstyr, kan der nu foretages målinger på de forskellige opbygninger af stabilgrus og bundsikringslag samt underbunden.

Resultater

I dette afsnit beskrives databehandlingen af alle målingerne med let faldlod samt klassifikationsresultater og CPN resultater. Da alle undersøgelser er udført efter samme fremgangsmåde, er denne beskrivelse således generelt gældende for alle de undersøgte materialer. Resultatbehandlingen tager udgangspunkt i Vejdirektoratets vejledning i brugen af let faldlod [Vejdirektoratet, 2007].

Det anbefales at foretage målinger med let faldlod, fra to forskellige faldhøjder. Derfor foretages i alt 20 målinger, som anses for at være et repræsentativt antal målinger. Målingerne fordeles så der foretages ti målinger med lav faldhøjde og ti med høj faldhøjde på hvert materiale. Resultatarbejdet er sket efter følgende fremgangsmåde.

- Resultaterne fra faldlodsmålingerne deles i to grupper efter faldhøjde (lav/høj).
- Hver gruppe sorteres efter nedsynkning, gående fra største til laveste.
- De tre målinger i hver gruppe der har en indbyrdes spredning, af nedsynkningen, på max 5% anvendes i det videre arbejde.
- Der beregnes gennemsnitlige E-moduler for de tre målinger i hver gruppe, med mindst spredning i nedsynkningen. Disse rapporteres sammen med den respektive faldhøjde.
- Der beregnes et E-modul for bundsikringen mellem hver indbygning, som sikrer at bundsikringen er ens mellem hver indbygning.
- Ud fra målingerne beregnes stabilgrustypernes materiale E-modul.
- Der foretages regressionsanalyse over måleresultaterne.
- Nonlineariteten bestemmes.

Ud fra vejledningen i anvendelsen af let faldlod, tolkes det at de tre målinger, som der beregnes spredning på, ikke behøver at være målt i rækkefølge [Vejdirektoratet, 2007].

Slutteligt opsummeres de fundne resultater, som leder hen til diskussionen af projektet. De ubehandlede faldlodsmålinger, kan ses i bilag F.

4.1 Planumundersøgelse

Enhver vejopbygning er ultimativt afhængig af underbunden der bygges på. Hvis planum er i ringe forfatning, uden den nødvendige bæreevne, skal der tages ekstra foranstaltninger i forhold til vejens dimensionering. Det er derfor essentielt at undersøge planums bæreevne, inden dimensionering af vejen. I forhold til dette projekt, undersøges det om bæreevnen på planum kan overholde vejdirektoratets vejledninger, anført i håndbogen for dimensionering af befæstelser [Vejdirektoratet, 2013]. Som tidligere nævnt i afsnit 2.2.1 på side 8, forudsættes det at underbunden er frosttvivlsom, hvilket betyder at bæreevnen på planum som minimum skal være 40 MPa.

Testformen er placeret i en mindre udgravning, hvor betonringene er placeret direkte på planum af kridt. Der er udført kontrol, midt i forsøgsopstillingen, af planum med let faldlod, se figur 4.1 og 4.2.



Figur 4.1. Faldlodsmåling på planum.



Figur 4.2. Faldlodsmåling på planum.

Der er udført målinger med to forskellige faldhøjder og kraftpåvirkninger, hvilket kan ses i nedentående tabel 4.1.

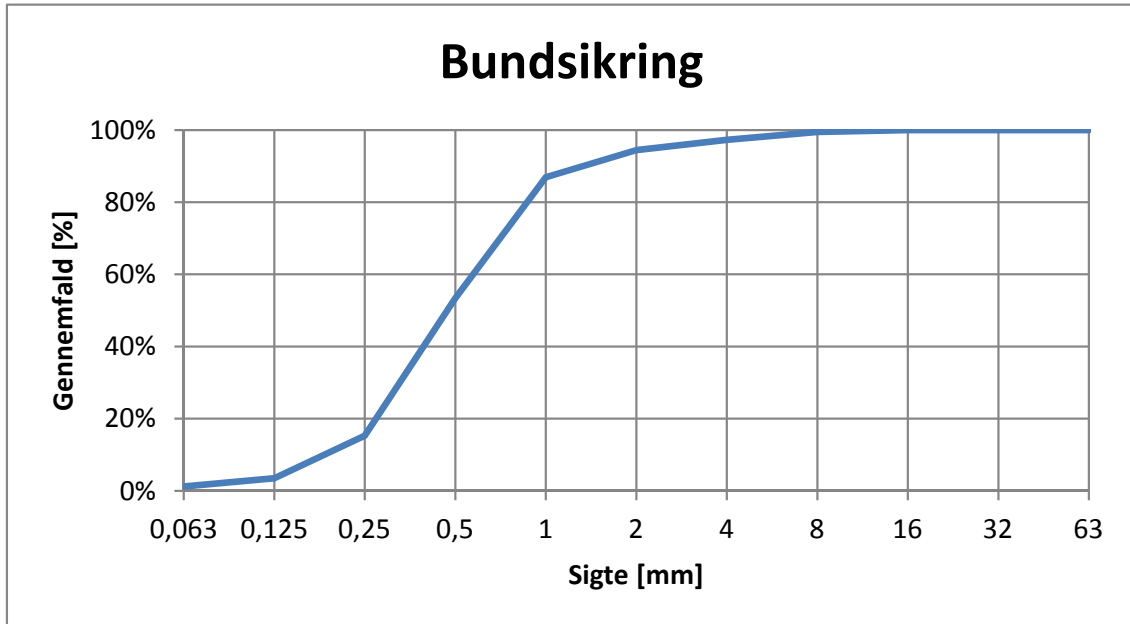
| Faldlodsmålingsresultater for planum | | | | | |
|--------------------------------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------------|---------------|
| Betegnelse | Pladeradius [m] | Faldhøjde [m] | Pladetryk [kPa] | Nedsynkning [μ] | E-modul [MPa] |
| $E_{0,50}$ | 0,15 | 0,19 | 52 | 27 | 424 |
| $E_{0,100}$ | 0,15 | 0,455 | 99 | 62 | 357 |

Tabel 4.1. Resultater af faldlodsmåling på planum.

Planum overholder til fulde minimumskravene til bæreevnen for planum. Der er derfor ingen grund til, at tage forholdsregler for dårlig bæreevne på planum.

4.2 Bundsikring

Dette afsnit omhandler bundsikringen til forsøgsopstillingen. Bundsikringen består hovedsageligt af sand, som er behæftet af en række materiale krav anført i AAB for bundsikring [Vejdirektoratet, 2003b].



Figur 4.3. Kornkurve for bundsikringssand.

På figur 4.3 ses kornkurven for bundsikringssandet. Her af kan det ses at sandet er forholdsvist velgradet. Sammen med sandækvivalent og U-tal, se tabel 4.2, kan denne type bundsikring klassificeres som et bundsikringsmateriale af den bedste klasse (BL I). I en BL I må der højst være 15% materiale over 63 mm. og højst 5% mindre en 0,063 mm., ligeledes at sandækvivalenten skal være på mindst 40 [Vejdirektoratet, 2003b].

| Klassifikationsforsøgsresultater Bundsikringssand | | | | |
|---|-----------------|--------------------------|----------------|-------|
| Tørdensitet [Kg/m^3] | Vandindhold [%] | Optimalt vandindhold [%] | Sandækvivalent | U-tal |
| 1641 | 5,4 | 12,2 | 70 | 3,4 |

Tabel 4.2. Standard proctor og sandækvivalent resultater for bundsikringssand.

Ud over at materialet skal kunne overholde en række krav, så er der endvidere lavet standard proctor test af sandet, se tabel 4.2 og figur C.1 i bilag C. Heri er det optimale vandindhold og tørdensitet fundet, hvilket senere anvendes i forbindelse med beregninger af komprimeringsgraden ved statistisk bestemmelse i prøvefeltet.

| CPN resultater for Bundsikringssand | | | |
|-------------------------------------|--------------------------|-----------------|------------------------------|
| Tørdensitet [Kg/m^3] | Våddensitet [Kg/m^3] | Vandindhold [%] | Komprimeringsgrad [%Proctor] |
| 1855,9 | 2034,6 | 9,6 | 109,3 |

Tabel 4.3. CPN resultater for opbygning med 375 mm. bundsikringssand i testform.

I tabel 4.3 og figur E.1 i bilag E, ses resultaterne fra CPN målingerne i felten. Som det ses overholder bundsikringen klart mindste komprimeringskrav på 92% i mere end 90% af laget. Selve kravet til komprimeringen lyder, at der for et minimumsantal af fem målinger, skal være en gennemsnitlig komprimering på >95% og at mindsteværdien skal være $\geq 92\%$ [Vejdirektoratet, 2003b]. Endvidere er vandindholdet 2,6% mindre end det optimale, hvilket ligger indenfor det optimale vandindhold ved indbygning, på 0-3% under det optimale vandindhold.

Efter at komprimeringen er godkendt, er der foretaget faldlodsmålinger på bundsikringen. Resultaterne heraf kan ses i tabel 4.4 og på figur F.5 i bilag F.

| Faldlodsmålingsresultater for Bundsikringssand | | | | | |
|---|-----------------|---------------|-----------------|-----------------------|---------------|
| Betegnelse | Pladeradius [m] | Faldhøjde [m] | Pladetryk [kPa] | Nedsynkning [μ] | E-modul [MPa] |
| $E_{0,100}$ | 0,15 | 0,46 | 102 | 265 | 101 |
| $E_{0,150}$ | 0,15 | 0,72 | 150 | 362 | 109 |

Table 4.4. Faldlodsmålingsresultater for opbygning med 375 mm. bundsikringssand i testform.

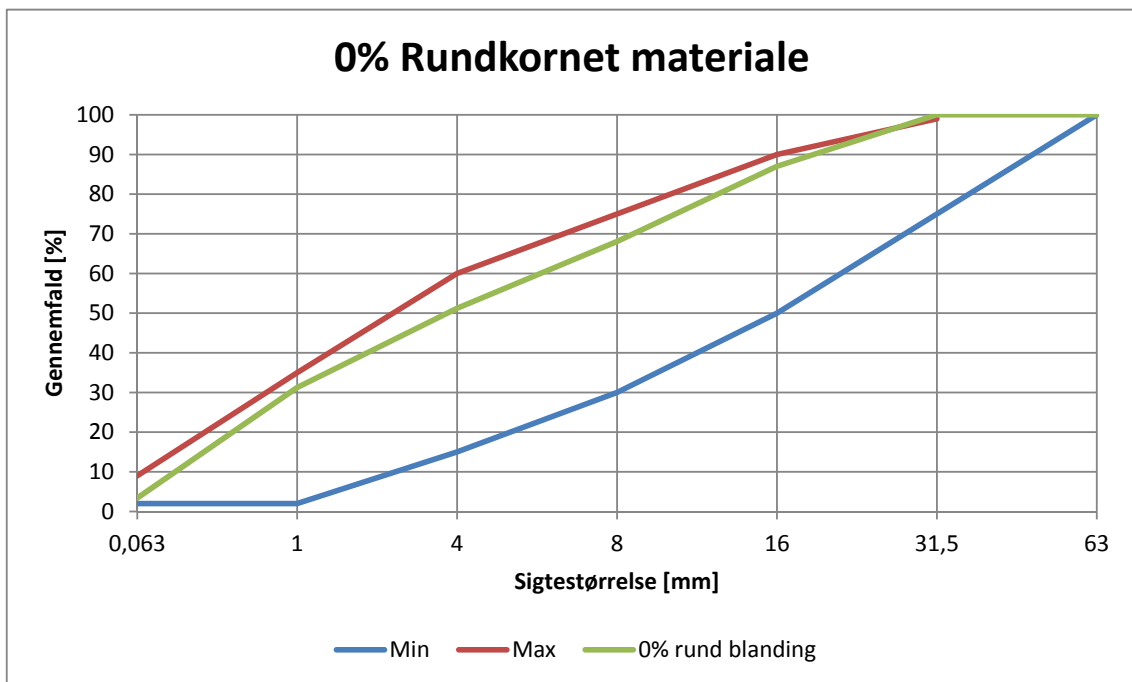
Efter denne gennemgang af resultaterne for bundssikringssandet, følger nu resultaterne for de forskellige stabilgrus blandinger.

4.3 0% Rundkornet materiale

I dette afsnit gennemgås resultaterne af de målinger der er foretaget på stabilgruset med 0% runde korn. Stabilgruset er sammensat af de udleverede materialer fra Kroghs A/S, efter følgende recept og i en mængde på 250 kg.:

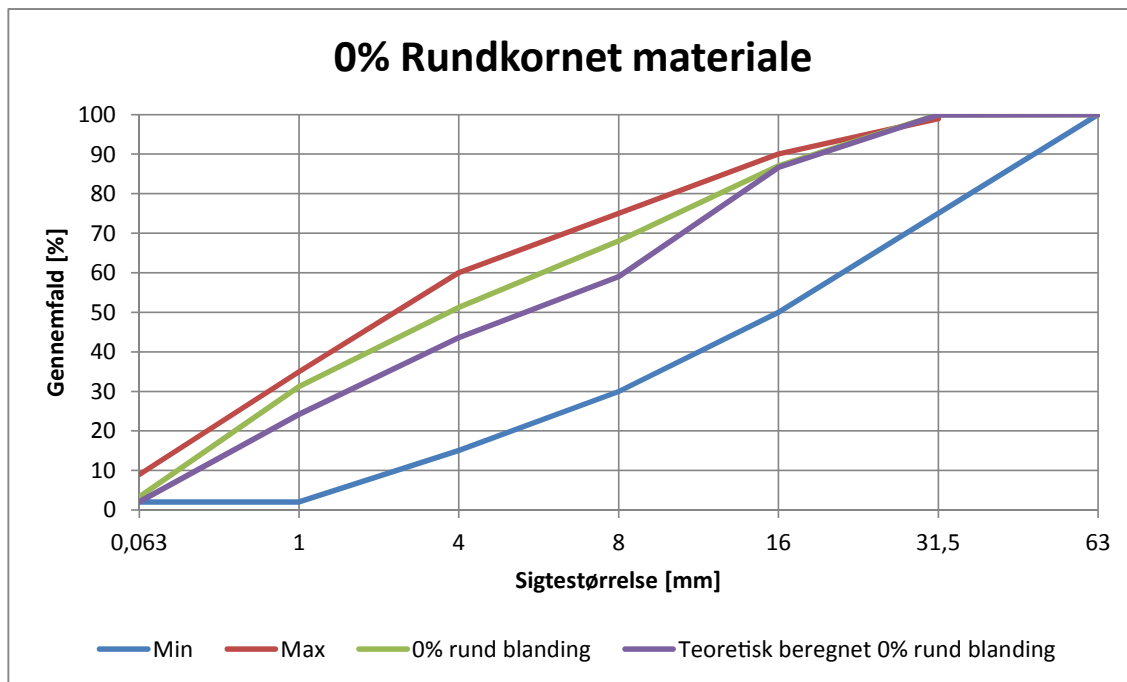
- 0/5 Fyldsand - 22,7 kg. \approx 9,1%
- 0/4 Stenmel - 79,5 kg. \approx 31,8%
- 2/8 Knust - 34,1 kg. \approx 13,6%
- 8/11 Knust - 34,1 kg. \approx 13,6%
- 11/16 Knust - 34,1 kg. \approx 13,6%
- 16/24 Knust - 45,5 kg. \approx 18,2%

Recepten for stabilgrusblandingen kan ses i bilag B på figur B.1. Der er foretaget en sigteanalyse, sandækvivalentundersøgelse samt proctorforsøg, jævnfør fremgangsmåde og standardhenvisninger i kapitel 3, for at kontrollere at stabilgruset kan overholde klassificeringskravene. Sigteanalysens resultat er indtegnet på figur 4.4.



Figur 4.4. Kornkurve 0% rundkornet materiale.

Det kan ses ud fra kornkurven på figur 4.4, at kornfordelingen i stabilgruset ligger tæt op ad de maksimalt tilladte værdier for kornfordelingen. Dette beviser en uoverensstemmelse mellem materialeklassifikationen af de forskellige sand- og grusfraktioner og kornfordelingen i stabilgrusblandingen. Denne uoverensstemmelse skyldes afvigelser mellem materialeklassificeringen og den faktiske fraktionsinddeling. Der vil naturligt ske omdeling af materialet, når det opbevares i dynger og håndteres fysisk ved udtagning af dele af materialet. Dette antages at være grunden til afvigelsen, mellem den beregnede kornkurve og den faktiske. På figur 4.5, er kornkurven for det teoretisk beregnede blandingsforhold indtegnet, i forhold til kornstørrelsefordelingen for den færdige blanding.



Figur 4.5. Kornkurve 0% rundkornet materiale vs. beregnet kornkurve.

På trods af afvigelserne fra den beregnede kornkurve, holder kornfordelingen sig inden for kravene og kan derfor benyttes. På figur 4.6 ses det endelige produkt med 0% runde korn.



Figur 4.6. Stabilgrus med 0% runde korn.

Der er ligeledes foretaget kontrol af stabilgrusblandingens sandækvivalent og optimale vandindhold, ved standard proctor forsøg. Resultaterne fra disse forsøg fremgår af tabel 4.5 og bilag C figur C.2.

| Klassifikationsforsøgsresultater for stabilgrus med 0% runde materialer | | | |
|--|-----------------|---------------------------|----------------|
| Tørdensitet [Kg/m^3] | Vandindhold [%] | Optimalt vandindhold [W%] | Sandækvivalent |
| 2014 | 2 | 7,5 | 75 |

Tabel 4.5. Standard proctor og sandækvivalent resultater for 0% blanding.

Stabilgruset overholder kravene til en sandækvivalent på min. 30 [Vejdirektoratet, 2003a]. Det følgende er resultater fra feltforsøg med indbygning af bundsikringssand og efterfølgende stabilgrus med 0% rundkornede materialer, efter fremgangsmåden beskrevet i kapitlet forsøgsfremgangsmåde.

Efter færdig indbygning, er det et krav at undersøge komprimeringsgraden af materialet [Vejdirektoratet, 2003a]. Dette gøres med en CPN isotopsondemåler. Komprimeringsgraden med 0% blandingen i forhold til reference tørdensiteten, fundet ved proctor indstampning, kan ses i tabel 4.6 og figur E.2 i bilag E.

| CPN resultater for stabilgrus med 0% runde materialer | | | |
|--|--------------------------|-----------------|------------------------------|
| Tørdensitet [Kg/m^3] | Våddensitet [Kg/m^3] | Vandindhold [%] | Komprimeringsgrad [%Proctor] |
| 2058 | 2253,6 | 4,6 | 98,7 |

Tabel 4.6. CPN resultater for stabilgrus med 0% runde korn.

Materialet antages at være tilfredsstillende komprimeret, idet det overstiger komprimeringskravet på 95% komprimering, for fem målinger. Endvidere ligger vandindholdet ved indbygningen 2,9% under det optimale vandindhold fundet ved proctorforsøg, hvilket ligger inden for det anbefalede vandindhold på 0-3% under det optimale vandindhold. Dernæst kontrolleres bæreevnen af den færdigindbyggede stabilgrus med let faldlod. Resultaterne fra faldlods-målingerne ses i tabel 4.7 og på figur F.1 i bilag F.

| Faldlodsmålinger for opbygning med stabilgrus indeholdende 0% runde materialer | | | | | |
|---|-----------------|---------------|-----------------|-----------------------|---------------|
| Betegnelse | Pladeradius [m] | Faldhøjde [m] | Pladetryk [kPa] | Nedsynkning [μ] | E-modul [MPa] |
| $E_{0,200}$ | 0,1 | 0,395 | 206 | 337 | 107 |
| $E_{0,300}$ | 0,1 | 0,636 | 296 | 399 | 130 |

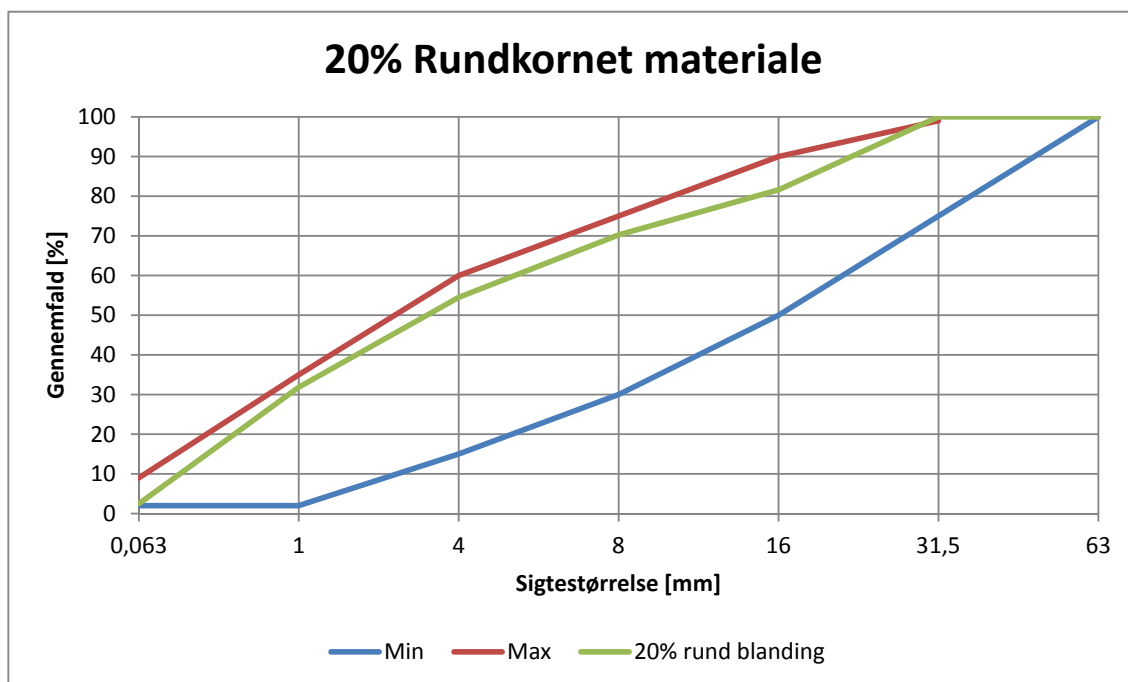
Tabel 4.7. Resultater af faldlodsmåling på en samlet opbygning med 375 mm. bundsikringssand og 160 mm. stabilgrus bestående af 0% rundkornede materialer.

4.4 20% Rundkornet materiale

I dette afsnit gennemgås resultaterne af de målinger der er foretaget på stabilgruset med 20% runde korn. Stabilgruset er sammensat af de udleverede materialer fra Kroghs A/S, efter følgende recept og i en mængde på 250 kg.:

- 0/5 Fyldsand - 25,0 kg. \approx 10%
- 0/4 Stenmel - 75,0 kg. \approx 30%
- 1/4 Rund - 6,25 kg. \approx 2,5%
- 4/8 Rund - 12,5 kg. \approx 5%
- 8/16 Rund - 12,5 kg. \approx 5%
- 16/28 Rund - 18,75 kg. \approx 7,5%
- 2/8 Knust - 18,75 kg. \approx 7,5%
- 8/11 Knust - 18,75 kg. \approx 7,5%
- 11/16 Knust - 31,25 kg. \approx 12,5%
- 16/24 Knust - 31,25 kg. \approx 12,5%

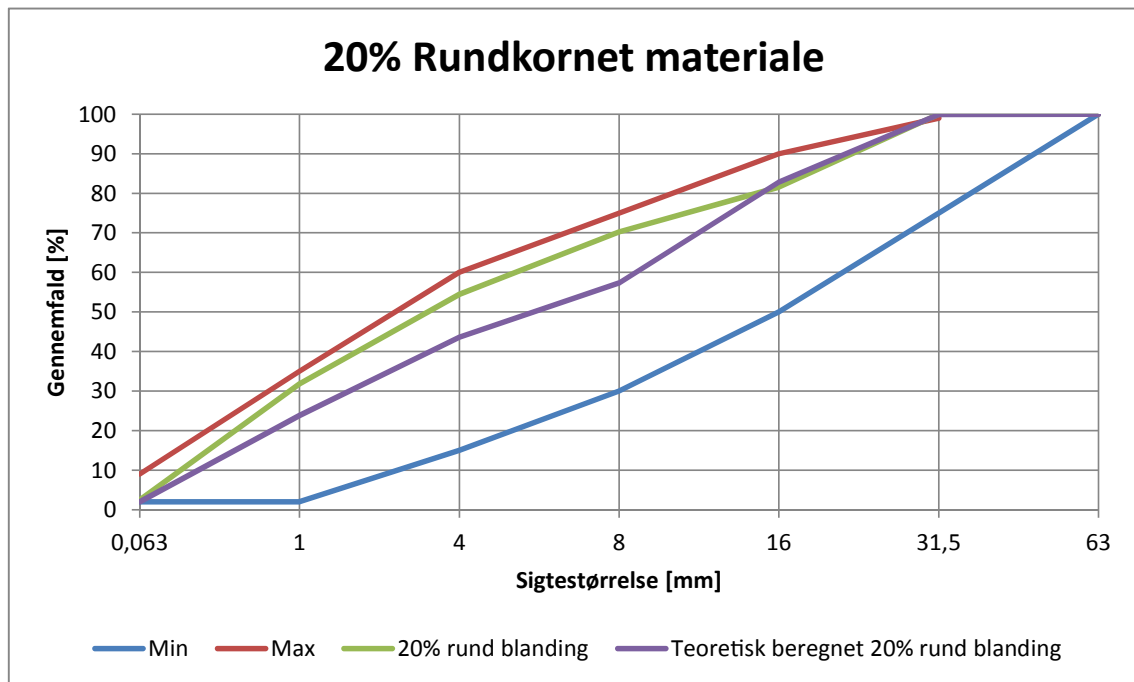
Recepten for stabilgrusblandingen kan ses i bilag B på figur B.2. Der er foretaget en sigteanalyse, sandækvivalentundersøgelse samt proctorforsøg, jævnfør fremgangsmåde og standardhenvisninger i kapitel 3, for at kontrollere at stabilgruset kan overholde klassificeringskravene. Sigteanalysens resultat er indtegnet på figur 4.7.



Figur 4.7. Kornkurve 20% rundkornet materiale.

Det kan ses ud fra ovenstående kornkurve på figur 4.7, at kornfordelingen i stabilgruset ligger tæt op ad de maksimalt tilladte værdier for kornfordelingen. Dette beviser igen at der er en uoverensstemmelse mellem materialeklassifikationen af de forskellige sand- og grusfraktioner og kornfordelingen i stabilgrusblandingen, som også er tilfældet for stabilgruset med 0% runde

korn. På figur 4.8, er kornkurven for det teoretisk beregnede blandingsforhold indtegnet, i forhold til kornstørrelsefordelingen for den færdige blanding.



Figur 4.8. Kornkurve 20% rundkornet materiale vs. beregnet kornkurve.

På trods af afvigelserne fra den beregnede kornkurve, holder kornfordelingen sig inden for kravene og kan derfor benyttes. På figur 4.9 ses det endelige produkt med 20% runde korn.



Figur 4.9. Stabilgrus med 20% runde korn.

Der er ligeledes foretaget kontrol af stabilgrusblandingens sandækvivalent og optimale vandindhold, ved standard proctor forsøg. Resultaterne fra disse forsøg fremgår af tabel 4.8 og figur C.3 i bilag C.

| Klassifikationsforsøgsresultater for stabilgrus med 20% runde materialer | | | |
|---|-----------------|---------------------------|----------------|
| Tørdensitet [Kg/m^3] | Vandindhold [%] | Optimalt vandindhold [W%] | Sandækvivalent |
| 2013,3 | 1,7 | 7 | 75 |

Tabel 4.8. Standard proctor og sandækvivalent resultater for 20% blanding.

Stabilgruset overholder kravene til en sandækvivalent på min. 30 [Vejdirektoratet, 2003a]. Det følgende er resultater fra feltforsøg med indbygning af bundsikringsand og efterfølgende stabilgrus med 20% rundkornede materialer, efter fremgangsmåden beskrevet i kapitlet forsøgsfremgangsmåde.

Efter færdig indbygning, er det et krav at undersøge komprimeringsgraden af materialet [Vejdirektoratet, 2003a]. Dette gøres med en CPN isotopsondemåler. Komprimeringsgraden med 20% blandingen i forhold til reference tørdensiteten, fundet ved proctor indstamping, kan ses i tabel 4.9 og figur E.3 i bilag E.

| CPN resultater for stabilgrus med 20% runde materialer | | | |
|---|--------------------------|-----------------|------------------------------|
| Tørdensitet [Kg/m^3] | Våddensitet [Kg/m^3] | Vandindhold [%] | Komprimeringsgrad [%Proctor] |
| 2093,7 | 2153 | 2,8 | 102,3 |

Tabel 4.9. CPN resultater for stabilgrus med 20% runde korn.

Materialet antages at være tilfredstillende komprimeret, idet det overstiger komprimeringskravet på 95% komprimering, i forhold til reference tørdensiteten. Dog ligger vandindholdet ved indbygning uden for de anbefalede 0-3% under det optimale vandindhold. Dette antages ikke influere med resultaterne, idet komprimeringskravet er overholdt. Dernæst kontrolleres bæreevnen af den færdigindbyggede stabilgrus med let faldlod. Resultaterne fra faldlodsmålingerne ses i tabel 4.10 og på figur F2 i bilag F.

| Faldlodsmålinger for opbygning med stabilgrus indeholdende 20% runde materialer | | | | | |
|--|-----------------|---------------|-----------------|-----------------------|---------------|
| Betegnelse | Pladeradius [m] | Faldhøjde [m] | Pladetryk [kPa] | Nedsynkning [μ] | E-modul [MPa] |
| $E_{0,200}$ | 0,1 | 0,395 | 197 | 261 | 133 |
| $E_{0,300}$ | 0,1 | 0,636 | 295 | 357 | 145 |

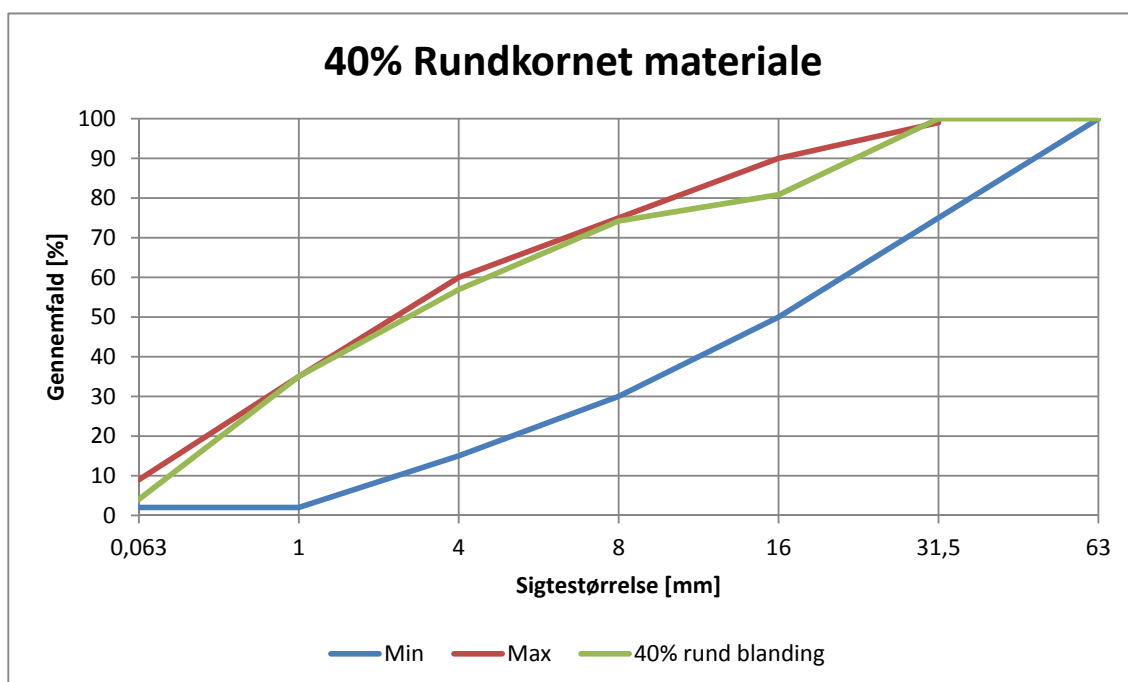
Table 4.10. Resultater af faldlodsmåling på en samlet opbygning med 375 mm. bundsikrings sand og 160 mm. stabilgrus bestående af 20% rundkornede materialer.

4.5 40% Rundkornet materiale

I dette afsnit gennemgås resultaterne af de målinger der er foretaget på stabilgruset med 40% runde korn. Stabilgruset er sammensat af de udleverede materialer fra Kroghs A/S, efter følgende recept og i en mængde på 250 kg.:

- 0/5 Fyldsand - 22,0 kg. \approx 8,8%
- 0/4 Stenmel - 75,0 kg. \approx 30%
- 1/4 Rund - 4,5 kg. \approx 1,8%
- 4/8 Rund - 24,5 kg. \approx 9,8%
- 8/16 Rund - 35,0 kg. \approx 14%
- 16/28 Rund - 35,0 kg. \approx 14%
- 2/8 Knust - 4,5 kg. \approx 1,8%
- 8/11 Knust - 9,0 kg. \approx 3,6%
- 11/16 Knust - 23,0 kg. \approx 9,2%
- 16/24 Knust - 17,5 kg. \approx 7%

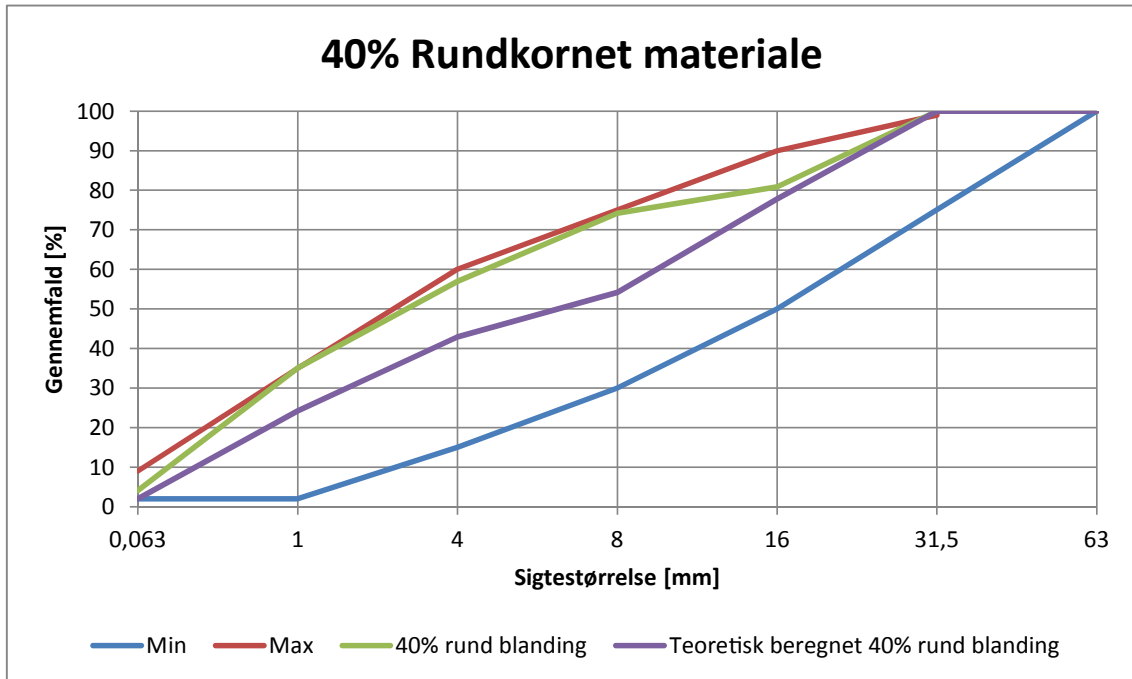
Der er foretaget en sigteanalyse, sandækvivalentundersøgelse samt proctorforsøg, jævnfør fremgangsmåde og standardhenvisninger i kapitel 3, for at kontrollere at stabilgruset kan overholde klassificeringskravene. Sigteanalysens resultat er indtegnet på figur 4.10.



Figur 4.10. Kornkurve 40% rundkornet materiale.

Det kan ses ud fra ovenstående kornkurve på figur 4.10, at kornfordelingen i stabilgruset ligger tæt op ad de maksimalt tilladte værdier for kornfordelingen. Den første blanding af dette stabilgrus gik over de tilladte grænseværdier, hvorefter der tilførtes mere materiale fra de store fraktioner. Dette udglattede kornkurven, således den akkurat kom indenfor grænseværdierne. Igen er der ikke overensstemmelse mellem materialeklassifikationen af de forskellige sand- og grusfraktioner og kornfordelingen i stabilgrusblandingen. På figur 4.11, er kornkurven for det

teoretisk beregnede blandingsforhold indtegnet, i forhold til kornstørrelsefordelingen for den færdige blanding.



Figur 4.11. Kornkurve 40% rundkornet materiale vs. beregnet kornkurve.

På trods af afvigelserne fra den beregnede kornkurve, holder kornfordelingen sig inden for kravene og kan derfor benyttes. På figur 4.12 ses det endelige produkt med 40% runde korn.



Figur 4.12. Stabilgrus med 40% runde korn.

Recepten for stabilgrusblandingen kan ses i bilag B på figur B.3. Der er ligeledes foretaget kontrol af stabilgrusblandings sandækivalent og optimale vandindhold, ved standard proctor forsøg. Resultaterne fra disse forsøg fremgår af tabel 4.11 og figur C.4 i bilag C.

| Klassifikationsforsøgsresultater for stabilgrus med 40% runde materialer | | | |
|---|-----------------|---------------------------|---------------|
| Tørdensitet [Kg/m^3] | Vandindhold [%] | Optimalt vandindhold [W%] | Sandækivalent |
| 2019,4 | 1,7 | 7,2 | 78 |

Tabel 4.11. Standard proctor og sandækivalent resultater for 40% blanding.

Stabilgruset overholder kravene til en sandækivalent på min. 30 [Vejdirektoratet, 2003a]. Det følgende er resultater fra feltforsøg med indbygning af bundsikringsand og efterfølgende stabilgrus med 40% rundkornede materialer, efter fremgangsmåden beskrevet i kapitlet forsøgsfremgangsmåde.

Efter færdig indbygning, er det et krav at undersøge komprimeringsgraden af materialet [Vejdirektoratet, 2003a]. Dette gøres med en CPN isotopsondemåler. Komprimeringsgraden med 40% blandingen i forhold til reference tørdensiteten, fundet ved proctor indstampning, kan ses i tabel 4.12 og figur E.4 i bilag E.

| CPN resultater for stabilgrus med 40% runde materialer | | | |
|---|--------------------------|-----------------|------------------------------|
| Tørdensitet [Kg/m^3] | Våddensitet [Kg/m^3] | Vandindhold [%] | Komprimeringsgrad [%Proctor] |
| 2135,5 | 2232,4 | 4,5 | 102,2 |

Tabel 4.12. CPN resultater for stabilgrus med 40% runde korn.

Materialet antages at være tilfredstillende komprimeret, idet det overstiger komprimeringskravet på 95% komprimering, i forhold til reference tørdensiteten. Endvidere ligger vandindholdet ved indbygning 2,7% under det optimale vandindhold, hvilket er inden for det anbefalede vandindhold på 0-3% under det optimale vandindhold ved indbygning. Dernæst kontrolleres bæreevnen af den færdigindbyggede stabilgrus med let faldlod. Resultaterne fra faldlodsmålingerne ses i tabel 4.13 og på figur E.3 i bilag F.

| Faldlodsmålinger for opbygning med stabilgrus indeholdende 40% runde materialer | | | | | |
|--|-----------------|---------------|-----------------|-----------------------|---------------|
| Betegnelse | Pladeradius [m] | Faldhøjde [m] | Pladetryk [kPa] | Nedsynkning [μ] | E-modul [MPa] |
| $E_{0,200}$ | 0,1 | 0,395 | 199 | 272 | 128 |
| $E_{0,300}$ | 0,1 | 0,636 | 298 | 357 | 146 |

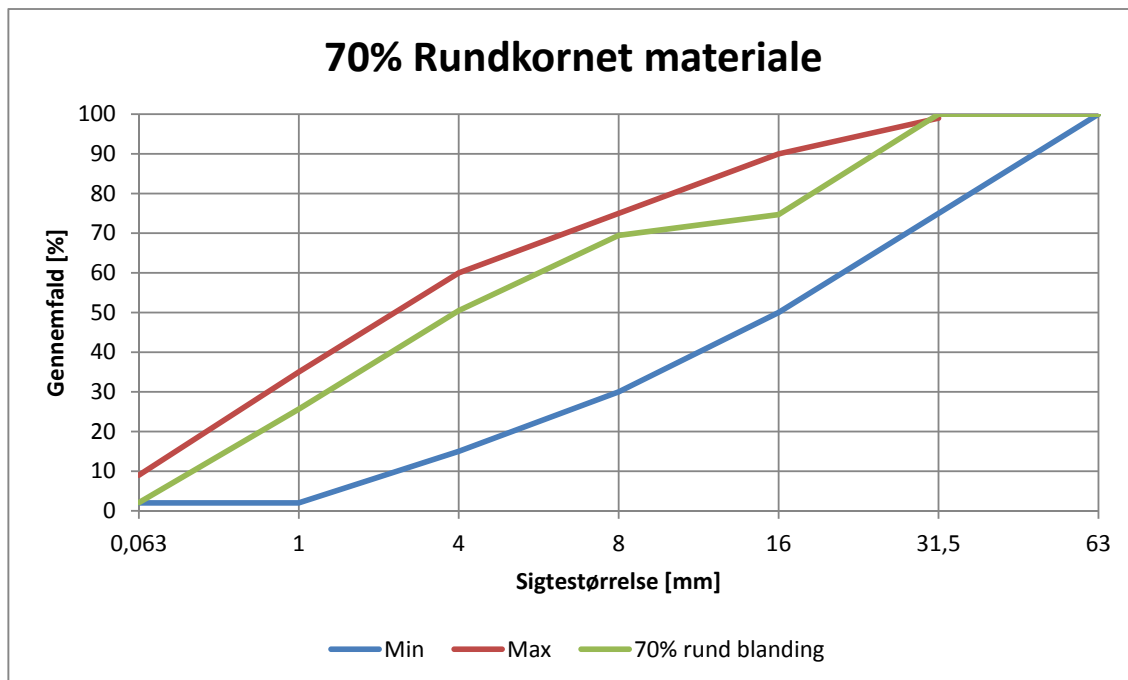
Table 4.13. Resultater af faldlodsmåling på en samlet opbygning med 375 mm. bundsikringsand og 160 mm. stabilgrus bestående af 40% rundkornede materialer.

4.6 70% Rundkornet materiale

I dette afsnit gennemgås resultaterne af de målinger der er foretaget på stabilgruset med 70% runde korn. Stabilgruset er sammensat af de udleverede materialer fra Kroghs A/S, efter følgende recept og i en mængde på 250 kg.:

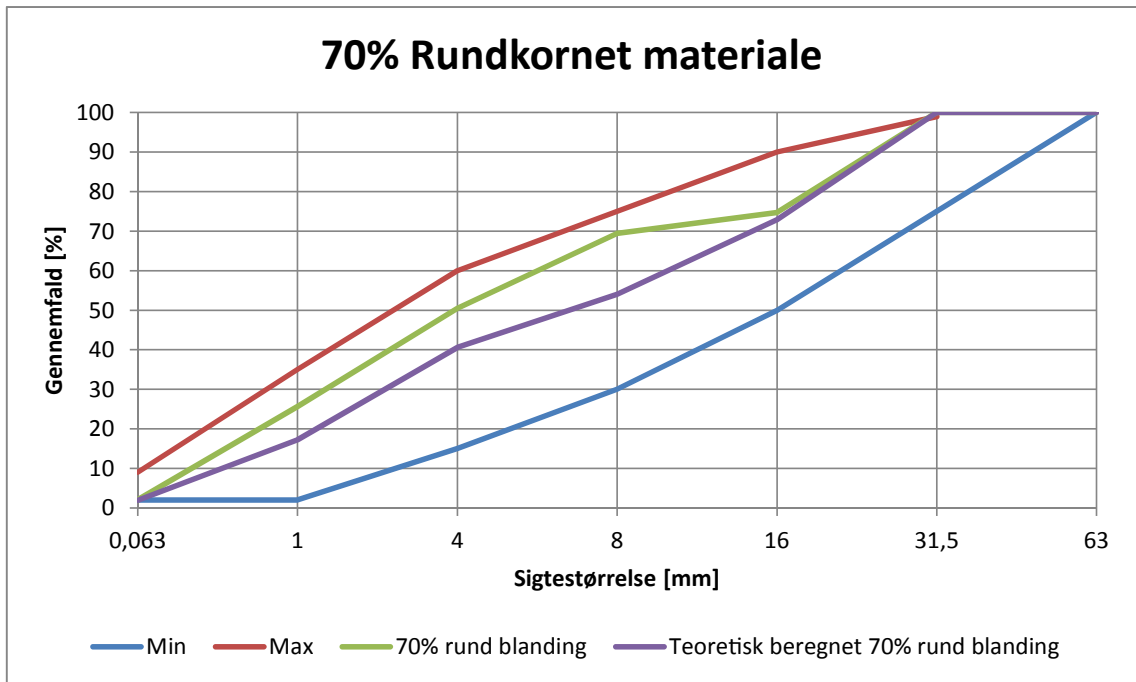
- 0/5 Fyldsand - 23,8 kg. \approx 9,5%
- 0/4 Stenmel - 52,0 kg. \approx 20,8%
- 1/4 Rund - 19,2 kg. \approx 7,7%
- 4/8 Rund - 37,9 kg. \approx 15,2%
- 8/16 Rund - 75,2 kg. \approx 30,1%
- 16/28 Rund - 41,9 kg. \approx 16,8%

Recepten for stabilgrusblandingen kan ses i bilag B på figur B.4. Der er foretaget en sigteanalyse, sandækvivalentundersøgelse samt proctorforsøg, jævnfør fremgangsmåde og standardhenvisninger i kapitel 3, for at kontrollere at stabilgruset kan overholde klassificeringskravene. Sigteanalysens resultat er indtegnet på figur 4.13.



Figur 4.13. Kornkurve 70% rundkornet materiale.

Det kan ses ud fra kornkurven på figur 4.13, at kornfordelingen af stabilgruset, ligeledes ligger tæt op ad de maksimalt tilladte værdier for kornfordelingen. I dette tilfælde overskred stabilgruset de tilladte grænseværdier, hvorefter der tilførtes mere materiale fra forskellige fraktioner. Dette udglattede kornkurven, således stabilgruset kan overholde grænseværdierne. I denne blanding er der heller ikke overensstemmelse mellem materialeklassifikationen af de forskellige sand- og grusfraktioner og kornfordelingen i stabilgrusblandingen. På figur 4.14, er kornkurven for det teoretisk beregnede blandingsforhold indtegnet, i forhold til kornstørrelsefordelingen for den færdige blanding.



Figur 4.14. Kornkurve 70% rundkornet materiale vs. beregnet kornkurve.

På trods af afvigelserne fra den beregnede kornkurve, holder kornfordelingen sig inden for kravene og kan derfor benyttes. På figur 4.15 ses det endelige produkt med 70% runde korn.



Figur 4.15. Stabilgrus med 70% runde korn.

Som det fremgår af figur 4.15 er der mange runde korn i overfladen af 70% blandingen. Dette skyldes at sandkornene ikke bindes til de større fraktioner af sten, hvormed det falder til bunden i pallen. Ved udlægningen i prøveopstillingen kunne det hurtigt konstateres, at omgangen med dette produkt var forholdvis vanskeligt og at der nemt kunne dannes stenreder i opbygningen. Dette løste sig ved, at udlægge små portioner af gangen og samtidig forsigtigt omrøre produktet.

Der er ligeledes foretaget kontrol af stabilgrusblandingens sandækvivalent og optimale vandindhold, ved standard proctor forsøg. Resultaterne fra disse forsøg fremgår af tabel 4.14 og figur C.5 i bilag C.

| Klassifikationsforsøgsresultater for stabilgrus med 70% runde materialer | | | |
|---|-----------------|---------------------------|----------------|
| Tørdensitet [Kg/m^3] | Vandindhold [%] | Optimalt vandindhold [W%] | Sandækvivalent |
| 2082,7 | 1,9 | 5,5 | 61 |

Tabel 4.14. Standard proctor og sandækvivalent resultater for 70% blanding.

Stabilgruset overholder kravene til en sandækvivalent på min. 30 [Vejdirektoratet, 2003a]. Det følgende omhandler resultater fra feltforsøg med indbygning af bundsikringssand og efterfølgende stabilgrus med 70% rundkornede materialer, efter fremgangsmåden beskrevet i kapitlet forsøgsfremgangsmåde.

Efter færdig indbygning, er det et krav at undersøge komprimeringsgraden af materialet [Vejdirektoratet, 2003a]. Dette gøres med en CPN isotopsondemåler. Komprimeringsgraden med 70% blandingen i forhold til reference tørdensiteten, fundet ved proctor indstampning, kan ses i tabel 4.15 og figur E.5 i bilag E.

| CPN resultater for stabilgrus med 70% runde materialer | | | |
|---|--------------------------|-----------------|------------------------------|
| Tørdensitet [Kg/m^3] | Våddensitet [Kg/m^3] | Vandindhold [%] | Komprimeringsgrad [%Proctor] |
| 2112,4 | 2168,2 | 2,6 | 97 |

Tabel 4.15. CPN resultater for stabilgrus med 70% runde korn.

Materialet antages at være tilfredsstillende komprimeret, idet det overstiger komprimeringskravet på 95% komprimering, i forhold til reference tørdensiteten. Endvidere ligger vandindholdet ved indbygning 2,9% under det optimale vandindhold, hvilket er inden for det anbefalede vandindhold på 0-3% under det optimale vandindhold ved indbygning. Dernæst kontrolleres bæreevnen af den færdigindbyggede stabilgrus med let faldlod. Resultaterne fra faldlodsmålingerne ses i tabel 4.16 og på figur F.4 i bilag F. De skal dog siges, at denne stabilgrus, på trods af komprimeringen, er forholdvis let at bryde op, hvilket må formodes de runde korns manglende evne til at "hængsle" sig sammen.

| Faldlodsmålinger for opbygning med stabilgrus indeholdende 70% runde materialer | | | | | |
|--|-----------------|---------------|-----------------|-----------------------|---------------|
| Betegnelse | Pladeradius [m] | Faldhøjde [m] | Pladetryk [kPa] | Nedsynkning [μ] | E-modul [MPa] |
| $E_{0,200}$ | 0,1 | 0,395 | 199 | 256 | 136 |
| $E_{0,300}$ | 0,1 | 0,636 | 299 | 338 | 175 |

Tabel 4.16. Resultater af faldlodsmåling på en samlet opbygning med 375 mm. bundsikringssand og 160 mm. stabilgrus bestående af 70% rundkornede materialer.

4.7 Sammenstilling af resultater

Resultaterne fra materialeklassificeringen, CPN isotopsonde målinger, samt faldlodsmålingerne sammenstilles i dette afsnit, således der kan opnås et overblik over de forskellige stabilgrus-typers egenskaber.

Materialeklassificeringen samt CPN resultaterne er indtastet i tabel 4.17.

| Resultatskema for klassificering af materialer | | | | | |
|--|-------------|--------|--------|--------|--------|
| Sand/Grus | Bundsikring | 0% | 20% | 40% | 70% |
| Sandækivalent | 70 | 75 | 75 | 78 | 61 |
| Naturligt Vandindhold [%] | 5,4 | 2,0 | 1,7 | 1,7 | 1,9 |
| Tørdensitet Proctor [Kg/m^3] | 1641,1 | 2014,0 | 2013,3 | 2019,4 | 2082,7 |
| Optimalt vandindhold [%] | 12,2 | 7,5 | 7,0 | 7,2 | 5,5 |
| Tørdensitet CPN [Kg/m^3] | 1855,9 | 2058,0 | 2093,7 | 2135,5 | 2112,4 |
| Våddensitet CPN [Kg/m^3] | 2034,6 | 2253,6 | 2153,0 | 2232,4 | 2168,2 |
| Vandindhold CPN [%] | 9,6 | 4,6 | 2,8 | 4,5 | 2,6 |
| Komprimeringsgrad [% Proctor] | 109,3 | 98,7 | 102,3 | 102,2 | 97,0 |

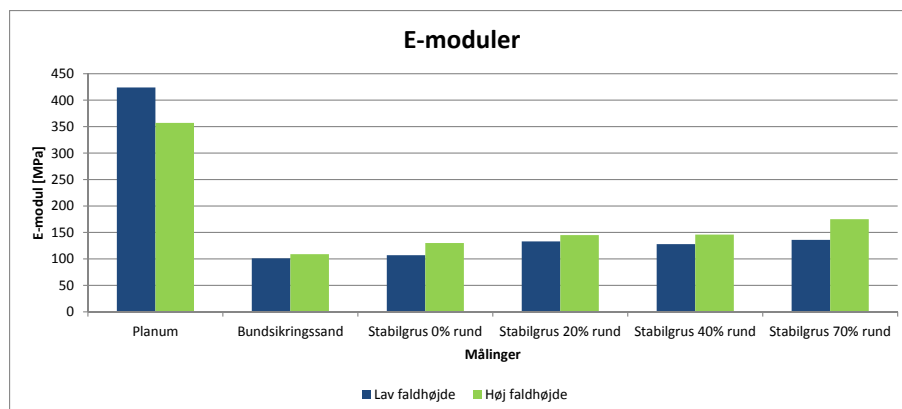
Tabel 4.17. Klassificerings- og CPN-resultater for de indbyggede materialer.

Resultaterne fra faldlodsmålingerne fra samtlige overflader, er opstillet i tabel 4.18.

| Resultatskema for faldlodsmålinger | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|--------|------|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Sand/Grus | Planum | | Bundsikring | | 0% | | 20% | | 40% | | 70% | |
| | Lav | Høj | Lav | Høj | Lav | Høj | Lav | Høj | Lav | Høj | Lav | Høj |
| Faldhøjde | | | | | | | | | | | | |
| Faldhøjde [m] | 0,19 | 0,45 | 0,46 | 0,72 | 0,39 | 0,63 | 0,39 | 0,63 | 0,39 | 0,63 | 0,39 | 0,63 |
| Pladeradius [m] | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 |
| Pladetryk [kPa] | 52 | 99 | 102 | 150 | 206 | 296 | 197 | 295 | 199 | 298 | 199 | 299 |
| Nedsynkning [μ] | 27 | 62 | 265 | 362 | 337 | 399 | 261 | 357 | 272 | 357 | 256 | 338 |
| E-modul [MPa] | 424 | 357 | 101 | 109 | 107 | 130 | 133 | 145 | 128 | 146 | 136 | 155 |

Tabel 4.18. Resultat fra faldlodsmålinger af samtlige overflader.

På figur 4.16, ses i grafisk illustration af overflade E-modulerne for planum, bundsikringsand og stabilgrus efter indbygning.



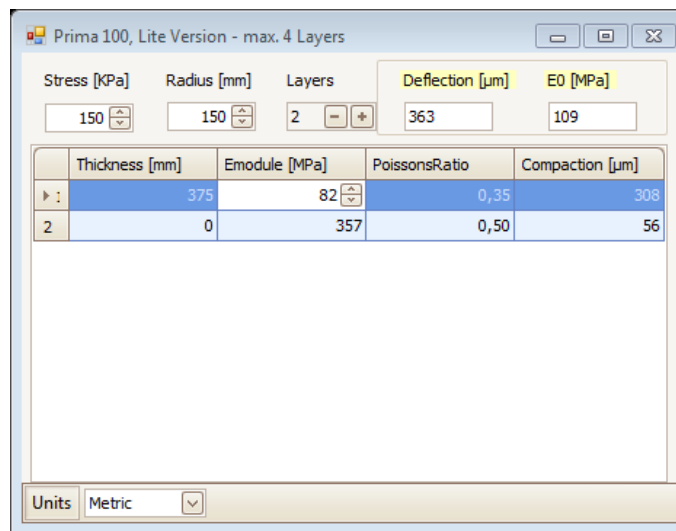
Figur 4.16. E-moduls resultater for de forskellige materialer.

4.8 Materiale E-modul

I forbindelse med projektet, udregnes de forskellige stabilgrusblandingers materiale E-moduler, så disse kan sammenlignes med det materiale E-modul, der er opgivet i Vejdirektoratets katalog omkring dimensionering af vejanlæg [Vejdirektoratet, 2013]. Som tidligere nævnt i kapitel 2, udtrykker materiale E-modulet den styrke, som det forventes et givent materiale har i beregningsammenhænge.

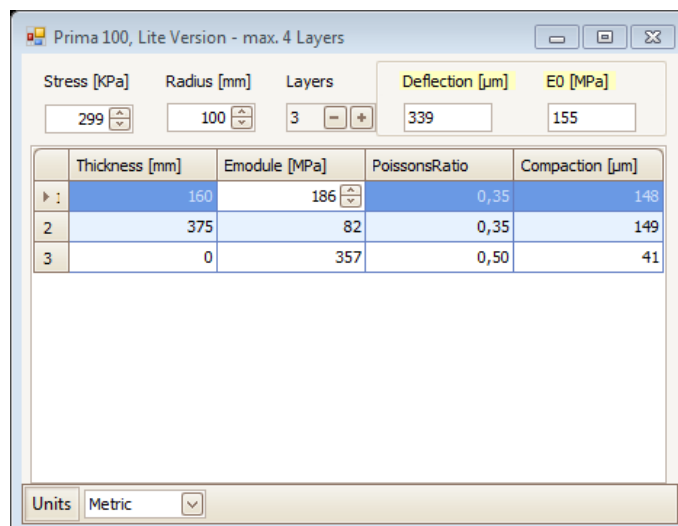
Til dette anvendtes programmet Compaction. Programmet kan med input fra faldloppet beregne de enkelte materials E-modul. Dette fungerer på den måde, at der regnes lagvist på opbygningen, således det E-modul som ønskes beregnet, i et bestemt lag, kun repræsenterer det isolerede materiale og ikke hele opbygningen.

Først indsættes den målte E-modul for planum i beregningsfeltet. Herefter indtastes det målte E-modul for bundsikringen, samt pladetrykket, pladediameteren og lagtykkelsen. Herefter justeres det indsatte E-modul, så tallet i E_0 feltet bliver samme som det målte på overfladen af laget, se figur 4.17. Dermed symboliserer E-modulet i beregningsfeltet materialets E-modul.



Figur 4.17. Compaction. Bundsikringslagets beregningsgang, Materialets E-modul er udregnet til 82MPa.

Herefter indsættes det sidste lag, som symboliserer stabilgruslaget. Igen indsættes pladetryk, pladediameter og lagtykkelse, hvorefter E-modulet justeres til, så E_0 viser det målte 4.18. Denne fremgangsmåde gentager sig for hver måling og udspringer til følgende resultater. I disse beregninger skal deflektionen (nedsynkningen) være nogenlunde tilsvarende med det målte. Ved gennemgang af beregningerne ses det, at der ikke er nogen nævneværdig forskel på deflektionen, idet denne varierede mellem 0-1 μ ved hver blanding.



Figur 4.18. Compaction. Stabilgrus beregningsgang for 70% blandingen.

I tabel 4.19 ses bundsikringslagets og stabilgrusblandingernes beregnede materiale E-moduler.

| Materiale E-moduler | | | |
|---------------------|-------------|-----------------|-------------------------|
| | E_0 [MPa] | Pladetryk [kPa] | Materiale E-modul [MPa] |
| Planum | 357 | | |
| Bundsikring | 109 | 150 | 82 |
| 0% | 130 | 296 | 141 |
| 20% | 145 | 295 | 168 |
| 40% | 146 | 298 | 169 |
| 70% | 155 | 299 | 186 |

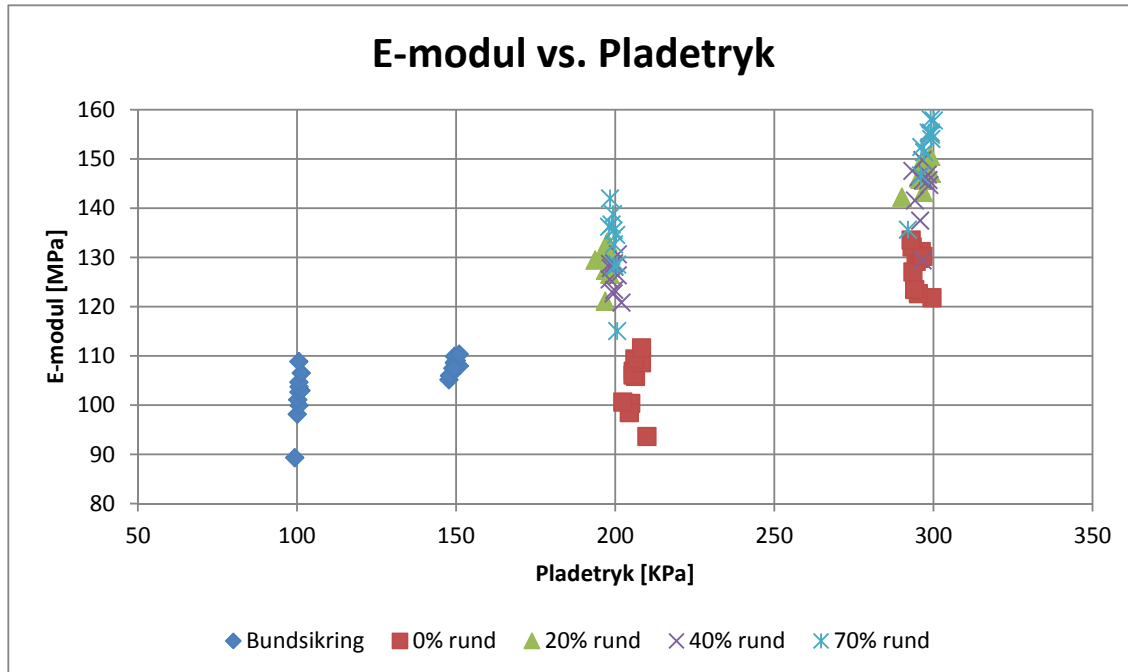
Tabel 4.19. I tabellen ses de beregnede materiale E-moduler.

Gennem disse beregninger ses det, at materiale E-modulerne ikke lever op til Vejdirektoratets generelle materiale E-modul på 300 MPa, som er opgivet i dimensioneringskataloget [Vejdirektoratet, 2013]. Ud fra denne betragtning, og de observationer der gjort ved indbygningen, stilles der nu undren ved de litterære værdier. Det tænkes at der i stedet for, at anvende en generel materiale E-modul, hvor det antages at materialet har den fornødne bæreevne, bør kigges mere på det materiale E-modul, som de enkelte materialer har ved indbygning. På denne måde tænkes det, at gøre det nemmere at se, om materialerne har den fornødne bæreevne.

Med disse materiale E-moduler kendes nu stabilgrustypernes beregnede individuelle styrke. Dette kan også tilnærmelsesvis ses ud fra målingerne i felten, hvormed dette vises i det følgende.

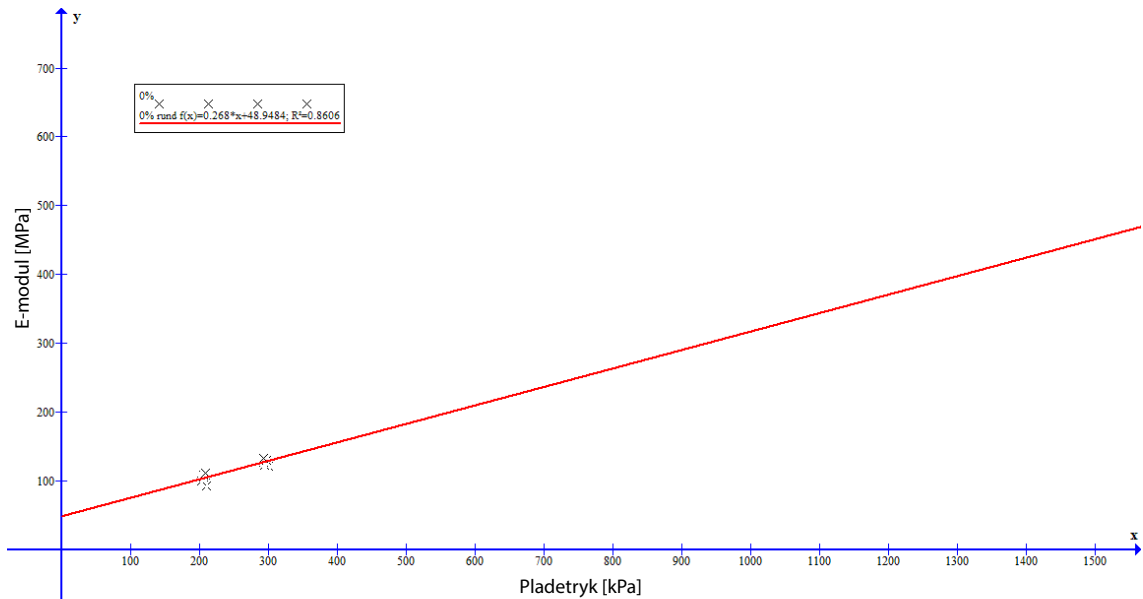
4.9 Regressionsanalyse

I forbindelse med resultatsbehandlingen er der foretaget regressionsanalyser af de målte data og efterfølgende på nonlinearitetsberegningerne. På figur 4.19 ses de forskellige E-moduler og pladetryk. På figuren ses at der er brugt forskelligt pladetryk, hvilket uddybes senere i afsnittet.



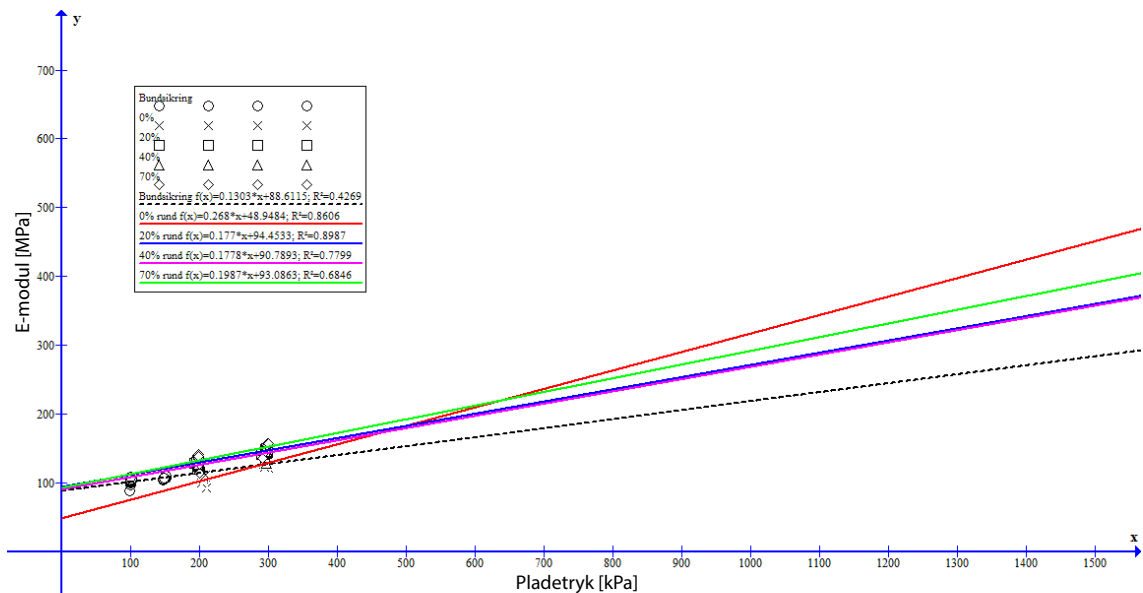
Figur 4.19. Scatterplot af samtlige faldlodsmålinger.

På figur 4.20 ses en enkelt regressionsanalyse foretaget på stabilgrustypen med 0% runde korn, mens den samlede regressionsanalyse vises på figur 4.21. Regressionsanalysen er fremkommet ved at plote målingerne fra figur 4.19 i et koordinatsystem, som funktion af E-modulet i forhold til pladetrykket.



Figur 4.20. Tendensplot af faldlodsmålingerne for stabilgruset med 0% runde korn.

Analysen viser at materialerne opfører sig som friktionsjorde, idet overflade E-modulet er stigende ved øget kontaktryk. Endvidere kan der ud fra analysen ses, hvor godt linjerne passer til de data, som der er anvendt (Korrelationskoefficienten R^2). Samtidig ses det at stabilgruset med knuste materialer, med et stigende pladetryk, vil ligge over materialerne med runde korn. Samme tendens er set hos amerikanske forskere, som tidligere har arbejdet med brug af forskellige mængder runde korn i vejbygningsmaterialer [Janoo og Bayer, 2001].



Figur 4.21. Tendensplot af rådata fra samtlige faldlodsmålinger.

Korrelationskoefficienten R^2 viser, hvor godt linjen er tilpasset måledata. I vejledningen om brugen af minifaldlod kan regresionsanalysen, på baggrund af R^2 , klassificeres som værende god eller tvivlsom ud fra de målinger, som der er foretaget. I vejledningen anvendes en R^2 på 0,7

som grænseværdi, hvilket tolkes som den værdi R^2 for målingerne, skal ligge over for at kunne klassificeres som værende gode. Til dette projekt anvendes ligeledes $R^2 = 0,7$. Som vejledningen tolkes, er det dog op til den enkelte selv at vurdere, hvilken R^2 som anvendes som grænseværdi [Vejdirektoratet, 2007].

I tabel 4.20 vises R^2 værdierne for regressionsanalysen. Heraf ses at blandingerne generelt kan betegnes som gode, mens bundsikringen betegnes tvivlsom.

| | Bundsikring | 0% | 20% | 40% | 70% |
|-------|-------------|-----|-----|-----|-----|
| R^2 | 0,4 | 0,9 | 0,9 | 0,8 | 0,7 |

Tabel 4.20. R^2 værdier oplistet.

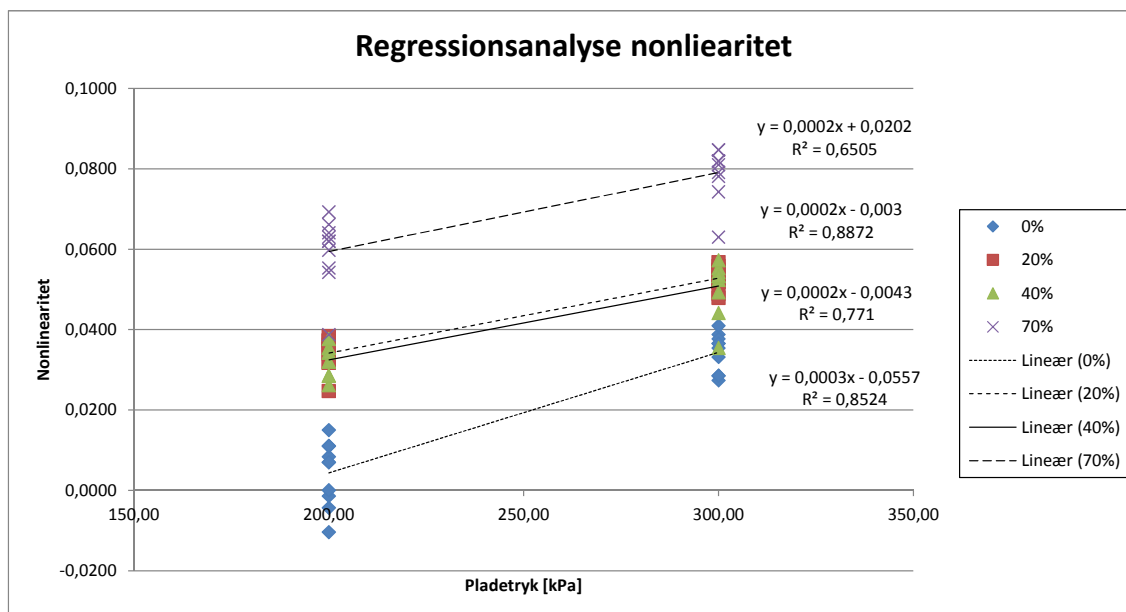
Endvidere er der udregnet nonlinearitet på stabilgrusblandingerne, som beskrives i formel 4.1. Nonlineariteten beskriver sammenhængen mellem et materiales E-modul og et varierende pladetryk. For en kohæssionsjord gælder at E-modulet falder med stigende pladetryk, mens det for friktionsjorde stiger med øget pladetryk [Vejdirektoratet, 2007].

$$E_0 = C_0 \times \left(\frac{\sigma_0}{100kPa} \right)^n \quad (4.1)$$

Af ligning 4.1 angiver E_0 det E-modul som der er målt på underlaget, mens C_0 det E-modul, som der er fremkommet ved et givent pladetryk, σ_0 er pladebelastningen i MPa og n angiver nonlineariteten. Hvis $n > 0$ er karakteriseres jorden som friktionsjord, mens $n < 0$ karakteriserer en kohæssionsjord.

I beregningerne er E_0 fastsat til de målinger, der er foretaget på bundsikringslaget mellem hver indbygning af stabilgrus. C_0 er for hver måling fastsat til, at være den målte værdi på toppen af stabilgruslaget. Ved at isolere i forhold til n , fremkommer figur 4.22, som viser nonlineariteten i forhold til forskellige pladetryk.

I dette tilfælde er der dog ikke målt med et pladetryk på 100kPa, men i stedet 200kPa og 300kPa. Derfor indsættes 200kPa/300kPa pladetryk og udtrykket under brøkstregen rettes ligeledes til 200kPa/300kPa, så der på den måde opnås lighed i formlen. Ved at isolere i forhold til n , kan det ses at stabilgrusblandingerne følger teorien og er friktionsjorde, beregningerne for nonlineariteten n kan ses i bilag G.



Figur 4.22. Nonlinearitetsplot beregnet ud fra formel 4.1.

Af figur er 4.22 ses det igen at R^2 værdierne ligger over det anbefalede R^2 på 0,7. De nye R^2 værdier er indsat i tabel 4.21.

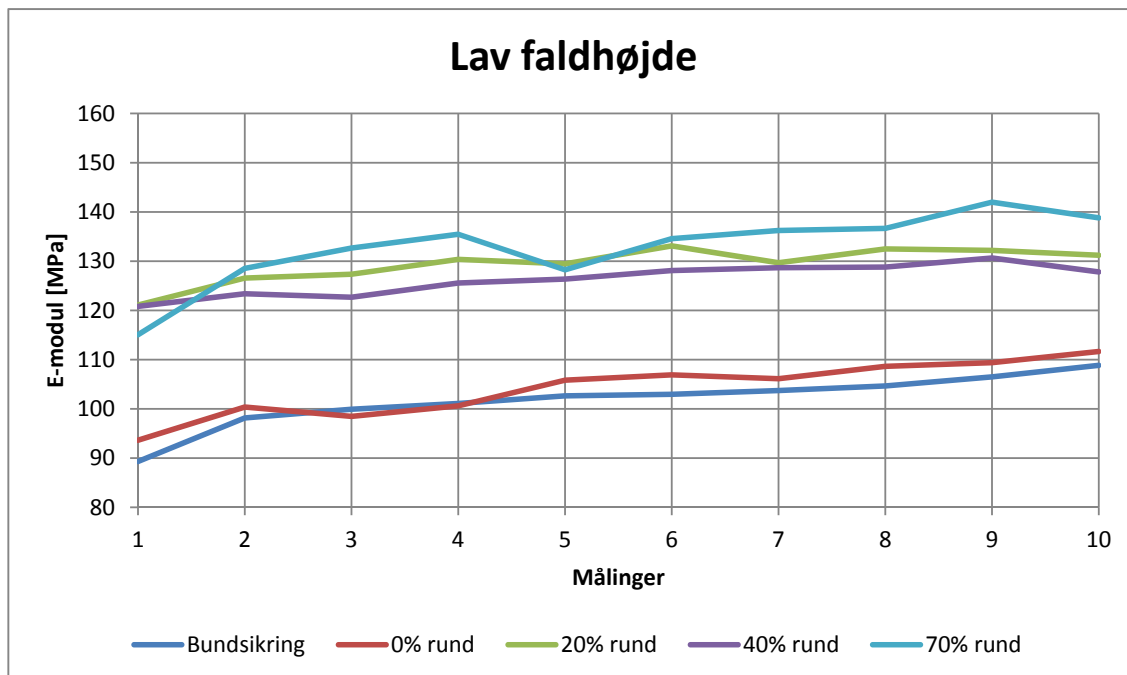
| | 0% | 20% | 40% | 70% |
|-------|-----|-----|-----|-----|
| R^2 | 0,9 | 0,9 | 0,8 | 0,7 |

Tabel 4.21. Nonlinearitet for forskellige blandinger.

Med de to forskellige regressionsanalyser ses det, at der er en vis forskel på overflade E-modulet, på de forskellige stabilgrusblandinger. Med et tænkt pladetryk, som ligger over det pladetryk der er muligt med let faldlod, ses det på figur 4.21 at stabilgruset uden runde korn, vil opnå et større overflade E-modul end de øvrige stabilgrustyper. Fælles for de to forskellige regressionsanalyser, er betragtningen af korrelationskoefficienten R^2 , som i begge tilfælde betegner samtlige stabilgrusblandinger som værende gode. Endvidere antyder begge analyser, at stabilgrus udelukkende bestående af knuste materialer, er styrkemæssigt bedre, ved højere trykpåvirkning.

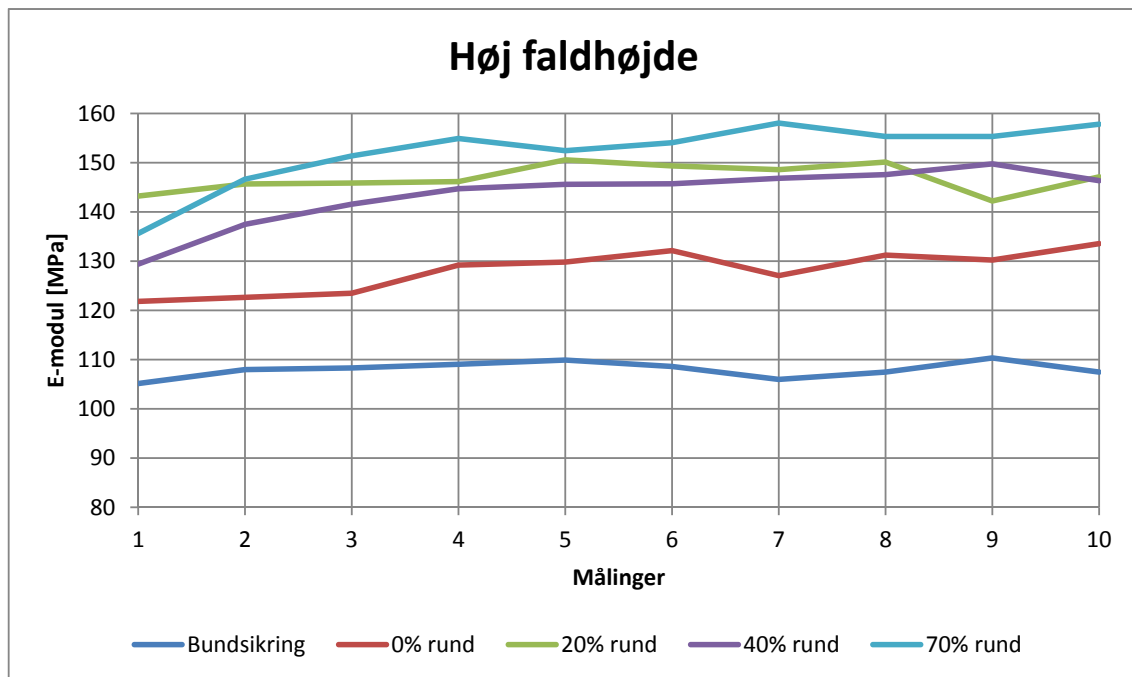
4.10 Resultatopsamling

Dette afsnit er en opsamling og kommentering af resultaterne fra indbygningen af de fire forskellige stabilgrusblandinger. Alle blandinger overholder kravene fra Vejdirektoratets AAB [Vejdirektoratet, 2003a]. På trods af det, er der store afvigelser i stabilgrusenes individuelle overflade E-modul. De forskellige blandingers E-moduler er optegnet på figur 4.23 og 4.24, med henholdsvis lav og høj faldhøjde. Lav faldhøjde refererer til et pladetryk på 100 KPa ved bundsikringssandet og 200 KPa ved stabilgrusene. Høj faldhøjde refererer til et pladetryk på 150 KPa ved bundsikringssandet og 300 KPa ved stabilgrusene. Dette er tidligere illustreret på figur 4.19, hvor pladetrykket ses opholdt mod E-modulet.



Figur 4.23. E-moduler ved lav faldhøjde.

Det ses tydeligt af figur 4.23, at der er en tydelig forskel i E-modulerne mellem stabilgruset uden runde korn og de resterende tre med runde korn i. Der er tilsyneladende ikke en markant styrkeforskel mellem stabilgrus med 0% runde korn og bundsikringen, når der måles med lav faldhøjde. Stabilgrustyperne med forskelligt indhold af rundkornede materialer, har derimod et markant større E-modul, end stabilgruset uden rundkornede materialer. Stabilgrustypen med størst E-modul, er ifølge faldlodsmålingerne, blandingen med 70% rundkornede materialer. Der kan dog ikke findes en markant forskel på blandingerne med henholdsvis 20% og 40% rundkornede materialer.



Figur 4.24. E-moduler ved høj faldhøjde.

Resultaterne for faldlodsmålingerne ved høj faldhøjde, ses på figur 4.24. Det ses tydeligt af resultaterne, at stabilgruset med 0% runde materialer, er tiltaget i styrke, i forhold til målingerne med lav faldhøjde. Dette betyder at forskellen i overfladestyrken, mellem stabilgrus uden og med runde materialer, ikke er så markant, som resultaterne med lav faldhøjde. Dog er det stadig den samme tendens der ses, at stabilgrusene med runde materialer, har større E-modul end stabilgruset uden runde materialer. Stabilgruset med 70% runde korn er den med højest E-modul og derved den stærkeste stabilgrus. Der er ingen markant forskel på E-modulerne med 20% og 40%, som tilfældet også er med resultaterne fra faldlodsmålingerne med lav faldhøjde. Desuden afspejler regressionsanalysen på figur 4.21, at E-modulet for blandingen med 0% runde korn med et større pladetryk, vil overstige de øvrige blandingers E-moduler. Desuden ligger alle blandignernes materialeparametre under de værdier, som der er oplyst i dimensioneringsvejledningen.

Med udgangspunkt i disse resultater er det derfor svært, at bestemme den bedste stabilgrus, men på baggrund af observationer under udlægning i prøvefeltet er det blandingen med 20% runde korn, som er den bedst egnet i forhold til anlægsarbejder. Dette skyldes hovedsageligt, at 40% og 70% blandignernes indhold af runde sten gør det vanskeligt at håndtere på en måde, hvorved der ikke skabes stenreder. Samtidig hænger materialet dårligere sammen, når andelen af runde korn øges.

4.11 Fejlkilder

Gennem projektforsøget er der opstået en række fejl af større eller mindre grad. Overordnet set har fejlene ikke haft en direkte indflydelse på resultaterne fra forsøgene. Der har dog været enkelte større fejl, som har betydet, at enkelte forsøg måtte gøres om.

Et generelt problem, som har været til gene gennem hele projektet, er prøveudtagningen af forskellige materialer. Det viste sig at være problematisk, at udtage repræsentative prøver til de forskellige laboratorieundersøgelser fra de opmagasinerede materialer i enkeltfraktioner.

Først og fremmest har det ved bestemmelse af sandækvivalent, voldt problemer at udtage to prøver til forsøgene, som resultatmæssigt ikke afveg fra hinanden med mere end de tilladte fire enheder. Som løsning herpå anvendtes i stedet en prøveneddeler, således prøven forud for forsøget neddeles til to portioner, som vægtmæssigt er nogenlunde ens. På denne måde kan det sikres at prøverne indeholder lige andele af de forskellige fraktioner af materialet, fra 4 mm. og ned.

Ved standard proctor forsøgene på stabilgrustyperne, ses det at vandindholdet kan svinge meget, mellem de udtagne prøver til bestemmelse af vandindhold. Grunden hertil kan skyldes to ting. Standard proctor ikke egner sig til bestemmelse af optimalt vandindhold på stabilgrus, da store korn influerer på vandindholdsbestemmelsen. Stort indhold af rundkornede materialer, bidrager til en dræning af gruset under kraftpåvirkning fra hammeren, således at delprøverne til vandindholdsbestemmelsen risikerer at bestå af delvist drænet grus. På baggrund af dette, er der yderligere udtaget prøver i forbindelse med indbygning, som viser vandindholdet for alle stabilgrustyperne på indbygningstidspunktet.

I forhold til indbygning af de forskellige materialer, viser det sig, at vandindholdet er svært at kontrollere i praksis. På baggrund af optimal vandindholdsbestemmelse ved proctor målingerne, bestemmes vandmængden, som kan tilsættes for at bringe vandindholdet op på det optimale niveau for indbygning. Ved indbygningen af bundsikringsandet udregnedes en manglende vandmængde på omkring 16 liter, til den samlede mængde bundsikringsand til indbygning. Dette viste sig ved CPN målingerne, at være meget over det optimale vandindhold, hvilket svækker bæreevnen væsentligt, hvorefter bundsikringsandet blev gravet op og lagt til tørre i et døgn. For ikke at gentage denne fejltagelse, er der ved efterfølgende forsøg, meget forsigtigt tilført vand, hvorefter det både visuelt og med CPN målinger, konstateres om materialerne havde det fornødne vandindhold til næste indbygning.

Ved de første målinger på stabilgrustyperne sås der en tendens til at grustyperne blev stærkere og stærkere for, hver gang der blev indbygget en ny stabilgrustype. Derfor måltes der til slut på bundsikringsandet med faldlod og det kunne ud fra faldlodsmålingerne ses, at dette havde fået den dobbelte styrke af, i forhold til udgangspunktet. Dette medfører at bundsikringsandet for, hver indbygning omrøres, genopbygges, komprimeres og kontrolleres med faldlod. Herved sikredes det at bundsikringsandet har det samme styrkemæssige udgangspunkt for, hver indbygning af en ny stabilgrus. Således kan det sikres at alle E-moduls målinger er sammenlignelige, når de er indbygget på samme vis, med samme styrke af bundsikringsandet målingerne imellem.

Diskussion

I forbindelse med dette projekt, er der mange aspekter der kan diskuteres. Under fire overskrifter diskuteres forskellige emner, erfaringer og observationer som er fremkommet i forbindelse med udarbejdelsen af dette projekt.

5.1 Metodediskussion

Ideen om at indbygge en traditionel vejopbygning i en lukket testform, anses for at være pålidelig. På baggrund af den eksisterende litteratur, findes det muligt at indbygge vejmaterialer i en lukket forsøgsopstilling. Størrelsen af en sådan forsøgsopstilling kan selvfølgelig diskuteres. I den eksisterende litteratur anvendes kubiske kasser af forskellige rumfang. Fælles for litteraturen, er en enighed om at kassen skal være af en vis størrelse, så det sikres at siderne ikke influerer på måleresultaterne. I forhold til dette tænkes det, at der må være en vis risiko for svagt komprimerede punkter i hjørnerne af en kubisk kasse, derfor anvendes der i dette projekt cirkulære brøndringe, således denne risiko elimineres.

En generel betragtning for prøvningsmetoden, er at der kan opstå ledningsgravseffekt ved brugen af en begrænset prøveform. Med ledningsgravseffekten menes, at det indbyggede materiale enten er stærkere eller svagere end omgivelserne, hvormed en ledningsgrav enten synker sammen eller vil stå som en hævet flade over vejoverfladen. Ud fra denne betragtning, kan det tænkes at en testform af brøndringe kan bidrage med en effekt, af at være stærkere end selve materialeopbygningen, hvorved dette kan have en effekt på måleresultater fra de forskellige materialer. Ud fra måleresultaterne er det dog umiddelbart svært at vurdere, om der er nogen form for ledningsgravseffekt.

Et andet punkt, som kan diskuteres er brugen af det lette faldlod versus statisk pladebelastning. På baggrund af både dansk og udenlandsk litteratur er der enighed om at det lette faldlod, kan anvendes som værktøj til test af materialers E-modul, men at dette ikke bør stå alene i forhold til en egentlig kvalitetssikring af vejbyggerier. Det lette faldlod har sin force i, at det er nemt at håndtere og at der hurtigt fremkommer et resultat. Statisk pladebelastning er meget tidskrævende at opsætte og udføre. Endvidere anvendes statisk pladebelastning og deformativt, hvilket betyder at der først testes på overfladen af f.eks. et stabilgruslag, hvorefter dette graves af, så der kan udføres test på bundsikringslaget osv., hvorimod faldlodet typisk anvendes i takt med opbygningen af lag [Hildebrand og Baltzer, 2003]. Resultatmæssigt er der også forskel på de to måletyper. Hvor resultaterne fra statisk pladebelastning oftest er udført med en statisk kraftpåvirkning, anvendes der ved det lette faldlod oftest dynamisk kraftpåvirkning i form af forskellige faldhøjder. Dette kan dog ikke ændre på at resultaterne fra statisk pladebelastning ligger over, hvad der resultatmæssigt kan forventes fra det lette faldlod. Dette kan hænge sammen med den energi der påføres jorden ved statisk pladebelastning, er meget større end den der påføres ved faldlodsmålinger. På trods af dette, er det i Danmark

alment anerkendt at anvende let faldlod, sammen med isotopsonde ved kvalitetskontrol af indbyggede vejbygningsmaterialer.

Gennem dette projekt er der anvendt en del litteratur i forskellige henseender. Generelt har litteraturen været meget brugbar, men på enkelte områder anses litteraturen for værende mangelfuld. Specielt synes vejdirektoratets vejledning til brugen af let faldlod [Vejdirektoratet, 2007], mangelfuld i forhold til, at det er en vejledning, som burde skabe en form for retningslinje for anvendelsen af det lette faldlod. Specielt går kritikken på, at det anbefales at bruge flere faldhøjder ved målinger, men det er ikke specificeret hvilke faldhøjder. Endvidere beskrives også, at der kan anvendes fast faldhøjde, men det er ikke klart, hvilken sammenhæng denne anvendes i. I stedet henvises til, hvor meget energi der skal tilføres belastningspladen ved måling på et givent materiale. På denne måde findes også en faldhøjde, men for nemheds skyld vil det være optimalt at anføre, hvilken faldhøjde loddet påfører belastningspladen en given energi, således målingerne udføres ens på tværs af anlægsprojekter. Endvidere beskrives det ikke klart, hvilket antal målinger der skal udføres, men at der som resultat, kun skal anvendes tre målinger med en indbyrdes spredning på maks. 5% af nedsynkningen. Dette kan tolkes sådan, at måleresultaterne kan rangeres efter nedsynkning, for derefter at beregne en spredning over tre målinger, uanset om de tre målinger er taget i rækkefølge. Det er herefter gennemsnittet af E-modulerne for de tre målinger, der er resultatet for målingen. Da der ikke er fundet andre beskrivelser af brugen af let faldlod i praksis i Danmark, er dette derfor eneste udgangspunkt der har været til rådighed.

5.2 Resultatdiskussion

Til dette projekt anvendes faldlodsmålinger. Der kunne i stedet være anvendt statisk pladebelastning, men da faldlodet har vundet indpas i Danmark, som målemetode til at teste vejbygningsmaterialers E-modul [Hildebrand og Baltzer, 2003], er dette anvendt. Det kan diskuteres, hvorvidt minifaldlodet måler korrekt og repræsentativt i forhold til den statiske pladebelastning, men Vejdirektoratet har lavet forsøg med forskellige faldlod og statisk pladebelastning, hvorefter de forskellige apparater indbyrdes sammenlignes. Heraf er der ikke nogen væsentlig forskel på apparaterne, men det anbefales at der ved forsøg, hvor der ønskes stor nøjagtighed bør anvendes statisk pladebelastning. I dette projekt anvendes det lette faldlod, idet universitetet ligger inde med udstyret, samt at forskellen resultatmæssigt på de to prøvningsmetoder ikke er udpræget stor.

På baggrund af målingerne er der fremkommet en række resultater, som viser at stabilgrusblandingerne med runde korn, har et større E-modul end den grusblanding, som udelukkende er bestående af skarpkantede korn. Denne observation strider dog imod den generelle opfattelse af at skarpkantede korn er bedre til at pakke og forankre sig med hinanden. Ved at foretage regressionsanalyse over alle blandingerne, ses det dog at 0% blandingen med store kontaktryk burde holde bedre end blandingerne med runde korn. Samme resultat er amerikanske forskere også nået frem til, ved at teste ubundne bærelag, med forskellige andele af rundkornede materialer [Janoo og Bayer, 2001]. Det skal siges, at uden regressionsanalysen er det svært at se, hvordan stabilgrustyperne ligger i forhold til hinanden indbyrdes.

Ud fra måleresultaterne er der udregnet materialeparametre for de forskellige blandinger af stabilgrus. Disse materialeparametre udtrykker materialets styrke og anses derfor som en parameter der bør udnyttes mere. Dette skyldes at der i dimensioneringskataloget [Vejdirektoratet, 2013] fra Vejdirektoratet er oplyst generelle materialeparametre, som bunder i erfaringer fra USA tilbage fra 1950'erne. I dette forsøg viste det sig nærmest umuligt at nå op

på de værdier, som er beskrevet i vejledningen, hvormed det tænkes at der på denne front burde ske en revision/opfølgning. Endvidere tænkes det, at der burde stilles krav til netop denne materialeparameter, så der ikke stoles blindt på materialeværdier, som er fra over 50 år gamle forsøg.

5.3 Produktdiskussion

I forbindelse med fremstilling(blanding) af de forskellige stabilgrustyper, har det overordnet været besværligt at blande stabilgrus der svarer til den beregnede blanding. Dette skyldes stor forskel mellem den indledende materialeklassificering, ved sigteanalyse og materialernes faktiske gradering, når materialerne ligger individuelt opmagasineret. Endvidere er det behæftet med stor usikkerhed at udtage repræsentative prøver, når de enkelte materialer ligger i dynger. Der sker en omfordeling af materialerne, hver gang de håndteres med håndkraft eller maskiner. De mindste fraktioner, har tendens til at "falde ned" mellem de større fraktioner ved håndtering. Derfor er det vigtigt at være omhyggelig med materialehåndteringen ved prøveudtagning, for at undgå fejlklassificering af de forskellige materialefraktioner. Der har formodentlig ikke været den fornødne omhyggelighed med prøveudtagning i projektet, da de beregnede kornkurver for stabilgrustyperne, er væsentligt afvigende fra de faktiske kornkurver, efter sammenblanding af de færdige stabilgrustyper.

Blandingsprocessen af de forskellige stabilgrustyper, som udføres ved afvejning af de enkelte fraktioner, efterfulgt af sammenblanding af materialerne med en tvangsblender til betonblanding, har formegentlig også været medvirkende til forskellen i den teoretisk og den faktisk materialeklassificering af stabilgrustyperne. Når materialerne opbevares, påvirkes de af vejret. På trods af neddækning af materialerne, for at hindre opblødning eller udtørring, kan vandprocenterne i materialerne alligevel svinge fra dag til dag. Det er derfor en udfordring at afveje de enkelte fraktioner i den bestemte mængde, da vandprocenten svinger på de enkelte fraktioner og har indflydelse på vægten af materialerne. På trods af at der tages højde for dette i blandeprocessen, afviger den faktiske blanding alligevel fra den beregnede blandings materialeklassificering.

Materialehåndtering er en yderst vigtig faktor, i såvel fremstillingen af stabilgrus som i den efterfølgende håndtering. Stabilgrus med et indhold af runde korn >40%, er vanskelige at håndtere. Dette skyldes at runde korn, arbejder sin vej ud i periferien af den samlede stabilgrus ved håndtering. Det giver specielt problemer med stenreder i stabilgruset. Dette gør håndteringen ekstra tidskrævende ved udlægninger i større mængder, da stabilgruset hele tiden skal omrøres/blandes i forbindelse ved udlægning, for at udgår stenreder. Derfor kan stabilgrus med større mængder >40% ikke anbefales til anlægsopgaver, grundet det store arbejdskrav til materialehåndteringen. Yderlige gør store mængder at runde korn, gruset ustabil og relativt nemt at bryde op, idet runde korns pakkeevne er dårlig. Det underbygger yderligere, at stabilgrus med store mængder runde korn er uegnet til større anlægsopgaver, men blot kan bruges i mindre afgrænsende projekter som i dette projekt.

Endvidere har store koncentrationer af runde korn, indflydelse på den måde vand drænes fra stabilgruset. Det ses tydeligt i forbindelse med proctorforsøg, hvor stabilgruset med $\geq 40\%$ runde korn, tydeligt drænes for vand, under kraftpåvirkning fra hammeren. Dette gør det derfor vanskeligt at indbygge stabilgrus med et korrekt vandindhold, da det er mere selvdrænende end stabilgrus med mange knuste eller kantede korn. Dette betyder også, at en stabilgrus med mange runde korn ikke vil have den fornødne bæreevne, idet vand kan passere direkte igennem laget.

5.4 Vejledningsdiskussion

Klassificeringen af stabilgrus II, godkender et indhold af rundkornede materialer i gruset, på op til 70%. I projektets afgrænsede prøvelfelt, er det eftervist at stabilgrus med op til 70% runde materialer, har større E-modul ved indbygning end stabilgrus med 0% runde materialer. På dette punkt er de gældende krav og vejledninger retvisende i forhold til bæreevnen af stabilgrus, om end det i projektet ikke er lykkedes at fremstille stabilgrus med en materialeklassificering på 300 MPa, som benyttes som beregningsforudsætning ved dimensionering af veje. Der er dog andre aspekter ved at fremstille en god stabilgrus, end at overholde kravene til kornkurve og sandækvivalent, samt komprimering ved indbygning. I takt med at de naturlige forekomster af egnede bakkematerialer til stabilgrus svinder ind, er det nødvendigt at tage alternative materialer i brug. Her er søsten et meget egnet materiale. Det er dog vigtigt at være opmærksom omkring andelen af runde materialers, indvirkning på håndterbarheden af stabilgruset. Det må derfor anbefales at nedknuse rundkornet materiale, således andelen af rundkornet materiale i stabilgrus, maksimalt vil udgøre omkring 40%, da en højere andel af runde korn, vil gøre stabilgruset umulig at håndtere i forbindelse med anlægsopgaver. I fremtiden bør de gældende krav og regler behæftet med stabilgrus, tages op til revision, i takt med de svindende ressourcer. Således det kan undgås at fremstille stabilgrus, der på trods af at overholde klassifikationskravene, er af ringe kvalitet og umulig at indbygge forsvarligt i praksis.

Yderligere kunne følgende punkter være fornuftige at tage op til revision i forhold til krav og vejledninger for stabilgrus:

- Øget fokus på stabilgrus som fysisk produkt - Kontrol under blanding og udlægning af stabilgrus, for at undersøge om stabilgruset har den fornødne robusthed som materiale.
- Yderligere kontrol efter indbygning - Ændret fokus fra klassificeringskrav, til fokus på bæreevnen af det færdigindbyggede grus.
- Bedre beskrivelse af målemetoder med let faldlod og efterbehandling af måleresultater.
- Beskrivelser af hvilke E-moduler der kan forventes at måle ved feltforsøg - i stedet for angivelse af materialeparametrene fra katalogmetoden.

Samlet set tegner der sig et billede af at krav og vejledninger omkring stabilgrus og kontrol heraf, bygger på erfaringer og gamle forsøg. Disse vejledninger stiller i højere grad krav til eftervisning af komprimering og ikke til eftervisning af bæreevne [Vejdirektoratet, 2007]. Derfor er der perspektiver i en revision af disse, så de er tidsvarende og kan opdateres i forhold til fremtidens udfordringer med råstofmangel til stabilgrus. Samtidig er der behov for øget fokus på stabilgrus som materiale og en revidering af klassificeringskravene, således det sikres at det ikke tillades at blande stabilgrus på op til 70% runde korn, hvilket er umuligt at håndtere i praksis.

Konklusion

Med afsæt i de fremkomne resultater i projektet, kan følgende konkluderes. Det er eftervist, at stabilgrus II kan overholde klassificeringskravene, med et indhold af rundkornede materialer på op til 70%. Det har dog vist sig at være umuligt, at opnå et materiale E-modul på 300 MPa, som anvendes som forudsætning for bæreevnen af stabilgrus II ved vejdimensionering. Samlet set har stabilgrus med et indhold af rundkornede materialer, på op til 70%, minimum samme overflade E-modul ved indbygning, som stabilgrus med 100% knuste materialer. Det har derfor ikke været muligt at eftervise at et stort indhold af runde materialer i stabilgrus, har en forringende indvirkning på E-modulet for stabilgrus ved indbygning i en testform.

Stabilgrus med 70% runde korn, er resultatmæssigt den stabilgrus med størst overflade E-modul ved indbygning. Der er dog andre aspekter, i forbindelse med bedømmelsen af en god stabilgrusblanding. I forbindelse med forsøgene, med indbygning af stabilgrus, har det vist sig at stabilgrus med 40% og 70% runde materialer, har tendens til at danne stenreder. Det er dog ikke udpræget i stabilgrus med 40% rundkornede materialer. Stabilgrus med >40% runde korn, er ikke anbefalelsesværdig i forhold til et håndteringsaspekt. Håndteringen af stabilgrus med >40% runde korn, antages at være for arbejdskrævende i anlægssammenhæng, hvormed det ikke kan anbefales, at benytte stabilgrus II med over 40% rundkornede materialer. Yderligere kan der konstateres en større dræningseffekt i stabilgruset, i takt med at indholdet af rundkornede materialer øges. Dette medfører en forringet stabilitet af gruset, idet vand kan passere gennem det komprimerede grus. Yderligere kan ses også, at det optimale vandindhold falder fra at ligge stabilt omkring 7% ved de første tre blandinger, til at ligge på omkring 5% i blandingen med 70% runde korn, se tabel 4.17. Dette tyder på, at et lavt optimalt vandindhold medfører en større dræningseffekt i stabilgrus.

Det optimale indhold af runde materialer i stabilgrus II, bør på baggrund af disse observationer og målinger ligge under 40%. På baggrund af dette projekt, kan det derfor konkluderes at stabilgrus med 20% runde korn, er optimal i forhold til håndterbarhed, komprimeringssevne og overflade E-modul ved indbygning.

Endvidere kan det konkluderes at det er muligt, at eftervise bæreevnen af bærelag i vejopbygninger, i mindre skala, i en afgrænset testform. I tillæg kan det yderligere konkluderes, at kontrol af overflade E-modul med mini faldlod er muligt. Dog kan det ikke anbefales, kun at anvende mini faldlod isoleret til eftervisning af et materiales overflade E-modul ved indbygning. Mini faldlodsmålinger bør og skal foretages sammen med et komprimeringskontrolapparat (CPN eller Troxler), hvorved det er fuldt ud konkurrencedygtigt, til bestemmelse af overflade E-modul, som andre bæreevne kontrolmetoder.

Konklusionen er at det absolut er muligt, at fremstille stabilgrus II med et indhold af rundkornede materialer på op til 70%, som overholder klassificeringskravene, men som materiale er umuligt at håndtere i praksis. Det er dog ikke muligt at opnå et materiale E-modul på 300 MPa for stabilgrus II, ved kontrol af bæreevne i vejbygningssammenhæng. Det

bør derfor overvejes om der skal stilles andre krav til stabilgrus II, hvor der er mere fokus på stabilgrus som fysisk materiale og dets praktiske håndterbarhed, i takt med de naturlige forekomster af sten/grus og sand, på land svinder ind.

Litteratur

- Alshibli, Abu-Farsakh, og Seyman, 2005.** Khalid A. Alshibli, Murad Abu-Farsakh, og Ekrem Seyman. *Laboratory Evaluation of the Geogauge and Light Falling Weight Deflectometer as Construction Control Tools*. URL: <http://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/%28ASCE%290899-1561%282005%2917%3A5%28560%29>, 2005. Downloadet: 04-03-2014.
- Asfaltindustrien, 2004.** Asfaltindustrien. *Lærebog for Vejasfaltarbejde A*. Håndbog. Undervisningsministeriet, 2004.
- CEN, 2010.** CEN. *DS/EN 13285*, 2010.
- CEN, 2008.** CEN. *DS/EN 13242 + AI*, 2008.
- CEN, 2013.** CEN. *DS/EN 933-1*, 2013.
- CEN, 2012.** CEN. *DS/EN 933-8: 2012*, 2012.
- CEN, 2011.** CEN. *DS/EN 13286-2: 2011*, 2011.
- Elhakim, Elbaz, og Amer, 2013.** Amr F. Elhakim, Khaled Elbaz, og Mohamed I. Amer. *The use of light weight deflectometer for in situ evaluation of sand degree of compaction*. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1687404813001041>, 2013. Downloadet: 04-03-2014.
- Hildebrand og Baltzer, 2003.** Gregers Hildebrand og Susanne Baltzer. *Statisk pladebelastning, faldlod og minifaldlod Resultater af sammenlignende målinger*. URL: http://www.vejdirektoratet.dk/DA/viden_og_data/publikationer/Lists/Publikationer/Attachments/317/not16.pdf, 2003. Downloadet: 19-03-2014.
- Hildebrant, 2005.** Gregers Hildebrant. *Minifaldlod på fastere grund med ny prøvningsmetode*. URL: <http://www.vejforum.dk/vejforum2005/73-Minifaldlod%20-%20ny%20pr%C3%B8vningsmetode%20-%20Gregers%20Hildebrand.pdf>, 2005. Downloadet: 04-03-2014.
- InstroTek, 2013.** INC. InstroTek. *MC-3 Operating Manual*. URL: <http://instrotek.com/wordpress/wp-content/uploads/MC-3-Operating-Manual.pdf>, 2013. Downloadet: 19-05-2014.
- Jakobsen, 2007.** Poul-Erik Jakobsen. *Brugen af let faldlod*. Dansk Vejtidskrift, 12, 10–13, 2007.
- Janoo og Bayer, 2001.** Vincent C. Janoo og John J. Bayer. *The Effect of Aggregate Angularity on Base Course Performance*. URL: http://vtransengineering.vermont.gov/sites/aot_program_development/files/documents/materialsandresearch/completedprojects/AOT_EffectofAggregateAngularityonBaseCoursePerformance13.pdf, 2001. Downloadet: 19-05-2014.

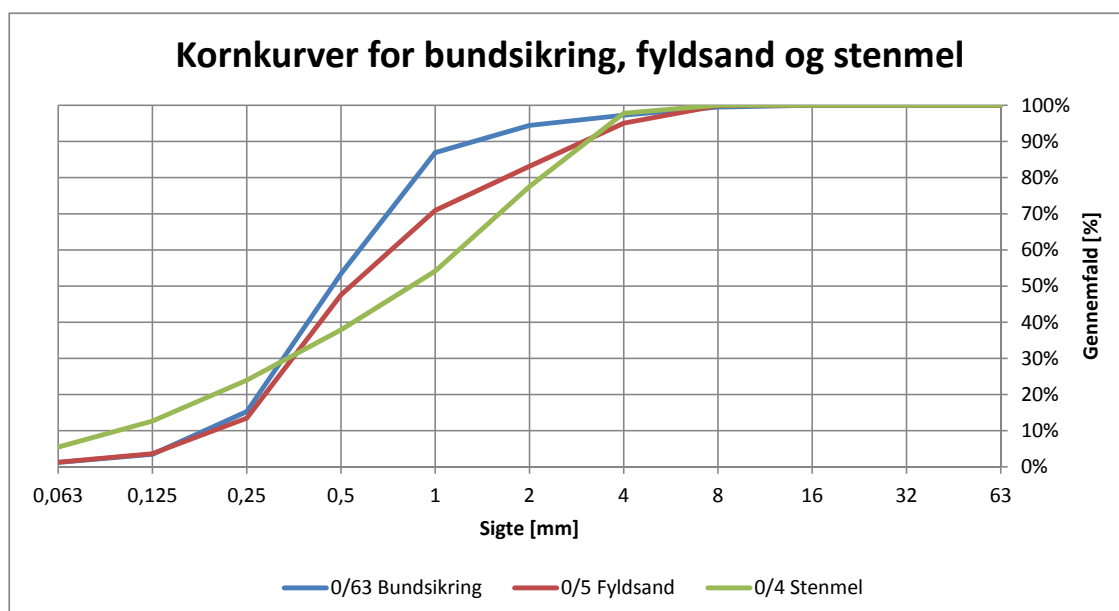
- NCC, 2001.** NCC. *Vejbygning*. Håndbog. NCC, 2001. ISBN 87-984200-0-3.
- Ovesen, Fugelsang, og Bagge, 2009.** Niels Krebs Ovesen, Leif D. Fugelsang, og Gunnar Bagge. *Lærebog i Geoteknik*. Håndbog. Polyteknisk Forlag, 2009.
- Parhamifar, 2011.** Ebrahim Parhamifar. *Analyses of Response and Development of Permanent Deformation of Unbound Granular Materials Using a Testing Box Technique*. Håndbog. Lund University - Doctoral thesis, 2011.
- Statistik, 2012.** Danmarks Statistik. *Råstofindvinding på land i 2011*. Håndbog. Danmarks Statistik, 2012.
- Thagesen, 1984.** Bent Thagesen. *Lærebog i vejbygning*. Håndbog. Polyteknisk Forlag, 1984.
- Vejdirektoratet, 2003a.** Vejdirektoratet. *Stabilt grus (AAB)*. URL: <http://vejregler.lovportaler.dk/ShowDoc.aspx?t=%2fV1%2fNavigation%2fTillidsmandssystemer%2fVejregler%2fUdbud%2fbefaestelser%2f&q=ubundne+materialer&docId=vd-20101209091911447-full>, 2003. Downloadet: 04-03-2014.
- Vejdirektoratet, 2003b.** Vejdirektoratet. *Bundsikring af sand og grus (AAB)*. URL: <http://vejregler.lovportaler.dk/showdoc.aspx?docId=vd-20101209091910979-full>, 2003. Downloadet: 04-03-2014.
- Vejdirektoratet, 2013.** Vejdirektoratet. *Dimensionering af befæstelser og forstærkningsbelægninger*. Håndbog. Vejdirektoratet, 2013.
- Vejdirektoratet, 2008.** Vejdirektoratet. *Råstofforsyning i Danmark - Sand, grus og sten*. Håndbog. Vejdirektoratet og Miljøministeriet, 2008.
- Vejdirektoratet, 2003c.** Vejdirektoratet. *Vejledning*. URL: <http://vejregler.lovportaler.dk/ShowDoc.aspx?t=%2fV1%2fNavigation%2fTillidsmandssystemer%2fVejregler%2fUdbud%2fbefaestelser%2f&q=ubundne+materialer&docId=vd-20101209091911307-full>, 2003. Downloadet: 04-03-2014.
- Vejdirektoratet, 2007.** Vejdirektoratet. *Måling af overflademodul med minifaldlod*. URL: <http://vejregler.lovportaler.dk/ShowDoc.aspx?t=%2fV1%2fNavigation%2fTillidsmandssystemer%2fVejregler%2fUdbud%2f&q=prvi+90-4&docId=vd-prvi-90-4-2007-full>, 2007. Downloadet: 19-03-2014.

Materialeklassificering

I det følgende er resultater af sigteanalyser, af de enkelte materialer, der benyttes til fremstilling af stabilgrus i dette projekt. Endvidere er der optegnet kornkurver, af de enkelte materialers kornfordeling.

Materialeklassificering af sand og stenmel

| Fraktion | 0/63 | 0/5 | 0/4 |
|-----------|-------------|------------|------------|
| Type | Bundsikring | Fyldsand | Stenmel |
| Opridelse | Prøvefelt | Bradsted | Bradsted |
| Sigte mm | Gennemfald | Gennemfald | Gennemfald |
| 63 | 100,0% | 100,0% | 100,0% |
| 32 | 100,0% | 100,0% | 100,0% |
| 16 | 100,0% | 100,0% | 100,0% |
| 8 | 99,5% | 99,9% | 100,0% |
| 4 | 97,3% | 95,1% | 97,8% |
| 2 | 94,4% | 83,1% | 77,5% |
| 1 | 86,9% | 70,9% | 54,1% |
| 0,5 | 53,4% | 47,6% | 37,9% |
| 0,25 | 15,3% | 13,5% | 24,0% |
| 0,125 | 3,5% | 3,6% | 12,7% |
| 0,063 | 1,2% | 1,3% | 5,5% |

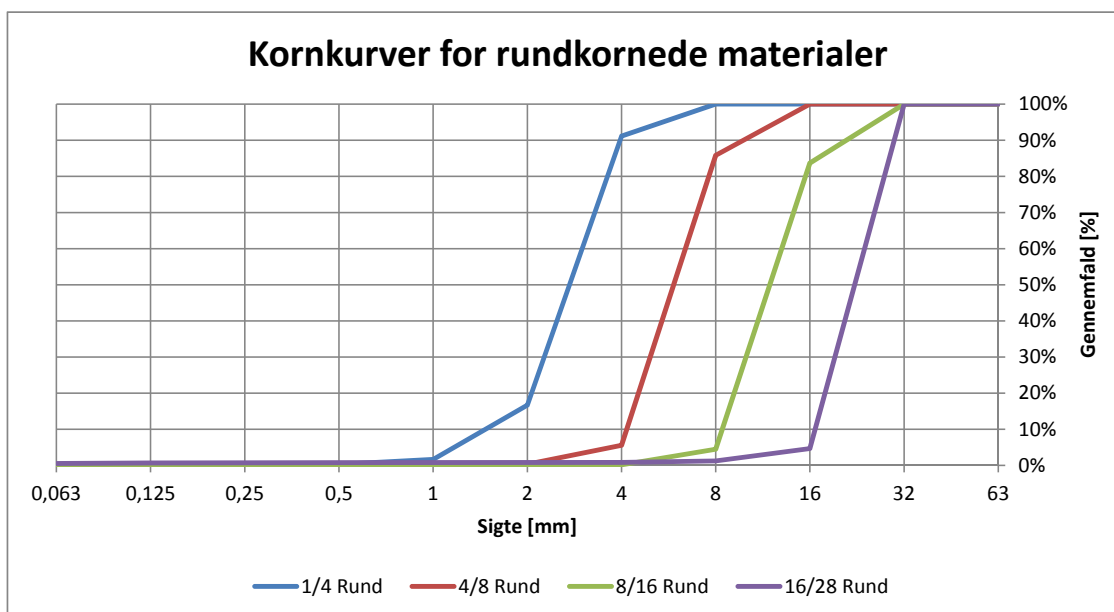


Figur A.1. Resultater fra sigteanalyse af bundsikringssand, fyldsand og stenmel.

Materialeklassificering af rundkornede materialer

| Fraktion | 1/4 | 4/8 | 8/16 | 16/28 |
|-----------|----------|----------|----------|----------|
| Type | Rund | Rund | Rund | Rund |
| Opridelse | Thyborøn | Thyborøn | Thyborøn | Thyborøn |

| Sigte mm | Gennemfald | Gennemfald | Gennemfald | Gennemfald |
|----------|------------|------------|------------|------------|
| 63 | 100,0% | 100,0% | 100,0% | 100,0% |
| 32 | 100,0% | 100,0% | 100,0% | 100,0% |
| 16 | 100,0% | 100,0% | 83,7% | 4,7% |
| 8 | 100,0% | 85,8% | 4,5% | 1,2% |
| 4 | 91,2% | 5,6% | 0,1% | 0,8% |
| 2 | 16,7% | 0,3% | 0,1% | 0,8% |
| 1 | 1,6% | 0,1% | 0,1% | 0,7% |
| 0,5 | 0,3% | 0,1% | 0,1% | 0,7% |
| 0,25 | 0,1% | 0,1% | 0,1% | 0,7% |
| 0,125 | 0,1% | 0,1% | 0,1% | 0,6% |
| 0,063 | 0,1% | 0,1% | 0,1% | 0,5% |

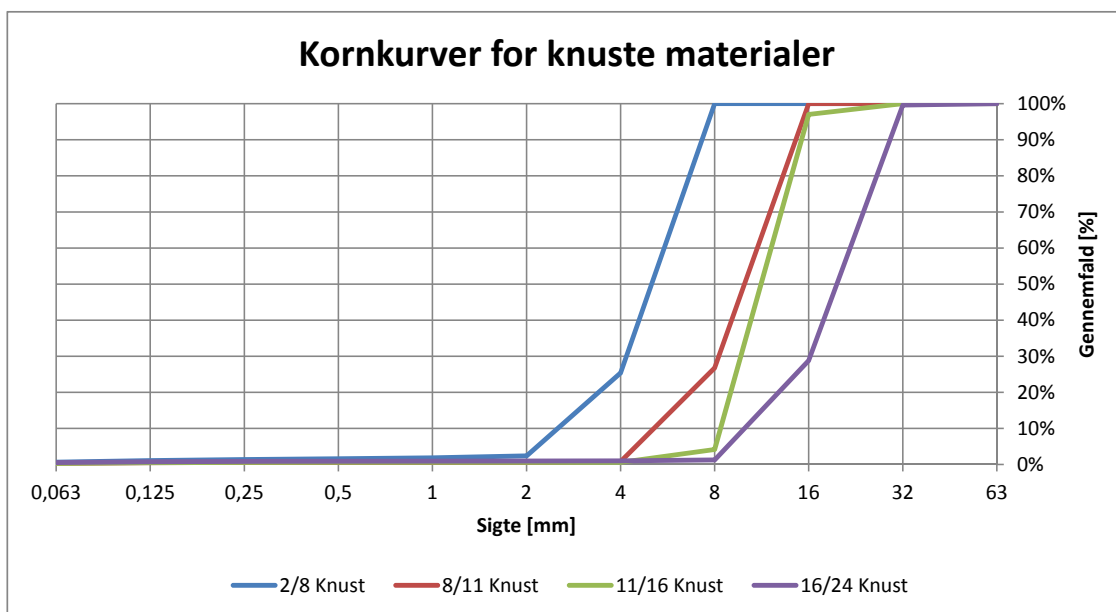


Figur A.2. Resultater fra sigteanalyse af de rundkornede materialer.

Materialeklassificering af knuste materialer

| Fraktion | 2/8 | 8/11 | 11/16 | 16/24 |
|-----------|----------|----------|----------|----------|
| Type | Knust | Knust | Knust | Knust |
| Opridelse | Bradsted | Bradsted | Bradsted | Bradsted |

| Sigte mm | Gennemfald | Gennemfald | Gennemfald | Gennemfald |
|----------|------------|------------|------------|------------|
| 63 | 100,0% | 100,0% | 100,0% | 100,0% |
| 32 | 100,0% | 100,0% | 100,0% | 99,6% |
| 16 | 100,0% | 100,0% | 97,0% | 28,8% |
| 8 | 100,0% | 26,7% | 4,1% | 1,2% |
| 4 | 25,4% | 0,8% | 0,6% | 1,0% |
| 2 | 2,4% | 0,6% | 0,6% | 0,9% |
| 1 | 1,8% | 0,6% | 0,6% | 0,9% |
| 0,5 | 1,6% | 0,6% | 0,6% | 0,9% |
| 0,25 | 1,3% | 0,6% | 0,5% | 0,8% |
| 0,125 | 1,0% | 0,5% | 0,5% | 0,7% |
| 0,063 | 0,6% | 0,3% | 0,3% | 0,5% |



Figur A.3. Resultater fra sigteanalyse af de knuste materialer.

Teoretisk kornkurveberegning

Det teoretiske blandingsforhold af stabilgruset, er bestemt ud fra den ønskede mængde stabilgrus på 250 kg., den procentvise fordeling af runde eller knuste materialer og materialeklassificeringen ved sigteanalyse af de forskellige sand/sten fraktioner.

Kornfordelingen oplistes for samtlige fraktioner, opdelt i forhold til gennemfaldet på de enkelte sigter. Summen af indholdet på sigterne, beregnes ud fra den procentvise fordeling af materialet, i forhold til det enkelte materiales kornfordeling på den givne sigte mm. Summen af kornfordeling for den teoretiske blanding optegnes og kontrolleres i forhold til grænsekurverne for SG II.

For at bestemme vægtfordelingen af de enkelte fraktioner, til blanding af stabilgruset, anvendes den procentvise fordeling af materialet. Den procentvise fordeling omregnes til en vægtmæssig fordeling, i forhold til den ønskede mængde stabilgrus på 250 kg. Derved fremkommer blanderecepten til det færdige stabilgrus.

De teoretiske blandingsforhold og de vægtmæssige fordelinger til blanding af stabilgrus, fra 0% til 70% er illustreret på figur B.1, B.2, B.3 og B.4.

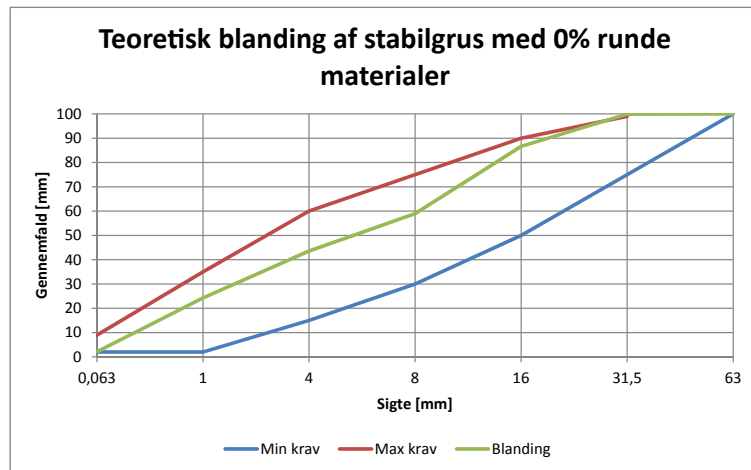
Teoretisk blanding af stabilgrus med 0% runde materialer

| Fraktion | 0/5 | 0/4 | 1/4 | 4/8 | 8/16 | 16/28 | 2/8 | 8/11 | 11/16 | 16/24 | Sum |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Type | Fyltsand | Stenmel | Rund | Rund | Rund | Rund | Knust | Knust | Knust | Knust | |
| Opridelse | Bradsted | Bradsted | Thyborøn | Thyborøn | Thyborøn | Thyborøn | Bradsted | Bradsted | Bradsted | Bradsted | |
| Andele | 2 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 3 | 3 | 4 22,0 |
| % fordeling | 9 | 32 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 14 | 14 | 14 | 18 100,0 |

| Sigte mm | Kornkurve | Kornkurve | Kornkurve | Kornkurve | Kornkurve | Kornkurve | Kornkurve | Kornkurve | Kornkurve | Kornkurve | Sum |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 63 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 32 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 99,6 99,9 |
| 16 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 83,7 | 4,7 | 100,0 | 100,0 | 97,0 | 28,8 86,6 |
| 8 | 99,9 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 85,8 | 4,5 | 1,2 | 100,0 | 26,7 | 4,1 | 1,2 59,0 |
| 4 | 95,1 | 97,8 | 91,2 | 5,6 | 0,1 | 0,8 | 25,4 | 0,8 | 0,6 | 0,6 | 1,0 43,6 |
| 2 | 83,1 | 77,5 | 16,7 | 0,3 | 0,1 | 0,8 | 2,4 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,9 32,9 |
| 1 | 70,9 | 54,1 | 1,6 | 0,1 | 0,1 | 0,7 | 1,8 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,9 24,2 |
| 0,5 | 47,6 | 37,9 | 0,3 | 0,1 | 0,1 | 0,7 | 1,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,9 16,9 |
| 0,25 | 13,5 | 24,0 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,7 | 1,3 | 0,6 | 0,5 | 0,5 | 0,8 9,3 |
| 0,125 | 3,6 | 12,7 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,6 | 1,0 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,7 4,8 |
| 0,063 | 1,3 | 5,5 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,5 | 0,6 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,5 2,1 |

| Kornkurveoptegning | | | | |
|--------------------|----------|----------|----------|--|
| Sigte mm | Min krav | Max krav | Blanding | |
| 0,063 | 2 | 9 | 2,1 | |
| 1 | 2 | 35 | 24,2 | |
| 4 | 15 | 60 | 43,6 | |
| 8 | 30 | 75 | 59,0 | |
| 16 | 50 | 90 | 86,6 | |
| 31,5 | 75 | 99 | 99,9 | |
| 63 | 100 | | 100,0 | |

| Vægtberegning | |
|--------------------------|-------------|
| Kg SG II | 250 |
| Procent | 100,0 |
| Procentdel | 2,5 |
| Knuste materialer | |
| 0/5 Fyltsand | 22,72727 kg |
| 0/4 Stenmel | 79,54545 kg |
| 2/8 Knust | 34,09091 kg |
| 8/11 Knust | 34,09091 kg |
| 11/16 Knust | 34,09091 kg |
| 16/24 Knust | 45,45455 kg |
| Runde materialer | |
| 1/4 Rund | 0 kg |
| 4/8 Rund | 0 kg |
| 8/16 Rund | 0 kg |
| 16/28 Rund | 0 kg |



Figur B.1. Teoretisk beregning for stabilgrus med 0% runde materialer.

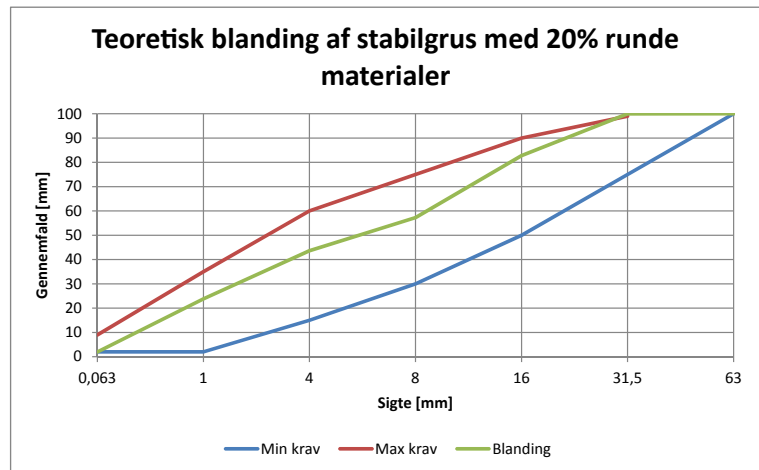
Teoretisk blanding af stabilgrus med 20% runde materialer

| Fraktion | 0/5 | 0/4 | 1/4 | 4/8 | 8/16 | 16/28 | 2/8 | 8/11 | 11/16 | 16/24 | Sum |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|
| Type | Fyldsand | Stenmel | Rund | Rund | Rund | Rund | Knust | Knust | Knust | Knust | |
| Opridelse | Bradsted | Bradsted | Thyborøn | Thyborøn | Thyborøn | Thyborøn | Bradsted | Bradsted | Bradsted | Bradsted | |
| Andele | 4 | 12 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 5 | 5 | 40,0 |
| % fordeling | 10 | 30 | 3 | 5 | 5 | 8 | 8 | 8 | 13 | 13 | 100,0 |

| Sigte mm | Kornkurve | Kornkurve | Kornkurve | Kornkurve | Kornkurve | Kornkurve | Kornkurve | Kornkurve | Kornkurve | Kornkurve | Sum |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|
| 63 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 32 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 99,6 | 99,9 |
| 16 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 83,7 | 4,7 | 100,0 | 100,0 | 97,0 | 28,8 | 82,8 |
| 8 | 99,9 | 100,0 | 100,0 | 85,8 | 4,5 | 1,2 | 100,0 | 26,7 | 4,1 | 1,2 | 57,3 |
| 4 | 95,1 | 97,8 | 91,2 | 5,6 | 0,1 | 0,8 | 25,4 | 0,8 | 0,6 | 1,0 | 43,6 |
| 2 | 83,1 | 77,5 | 16,7 | 0,3 | 0,1 | 0,8 | 2,4 | 0,6 | 0,6 | 0,9 | 32,5 |
| 1 | 70,9 | 54,1 | 1,6 | 0,1 | 0,1 | 0,7 | 1,8 | 0,6 | 0,6 | 0,9 | 23,8 |
| 0,5 | 47,6 | 37,9 | 0,3 | 0,1 | 0,1 | 0,7 | 1,6 | 0,6 | 0,6 | 0,9 | 16,5 |
| 0,25 | 13,5 | 24,0 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,7 | 1,3 | 0,6 | 0,5 | 0,8 | 8,9 |
| 0,125 | 3,6 | 12,7 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,6 | 1,0 | 0,5 | 0,5 | 0,7 | 4,5 |
| 0,063 | 1,3 | 5,5 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,5 | 0,6 | 0,3 | 0,3 | 0,5 | 2,0 |

| Kornkurveoptegning | | | |
|--------------------|----------|----------|----------|
| Sigte mm | Min krav | Max krav | Blanding |
| 0,063 | 2 | 9 | 2,0 |
| 1 | 2 | 35 | 23,8 |
| 4 | 15 | 60 | 43,6 |
| 8 | 30 | 75 | 57,3 |
| 16 | 50 | 90 | 82,8 |
| 31,5 | 75 | 99 | 99,9 |
| 63 | 100 | 100,0 | 100,0 |

| Vægtberegning | |
|--------------------------|--------------|
| Kg SG II | 250 |
| Procent | 100,0 |
| Procentdel | 2,5 |
| Knuste materialer | |
| 0/5 Fyldsand | 25 kg |
| 0/4 Stenmel | 75 kg |
| 2/8 Knust | 18,75 kg |
| 8/11 Knust | 18,75 kg |
| 11/16 Knust | 31,25 kg |
| 16/24 Knust | 31,25 kg |
| Runde materialer | |
| 1/4 Rund | 6,25 kg |
| 4/8 Rund | 12,5 kg |
| 8/16 Rund | 12,5 kg |
| 16/28 Rund | 18,75 kg |



Figur B.2. Teoretisk beregning for stabilgrus med 20% runde materialer.

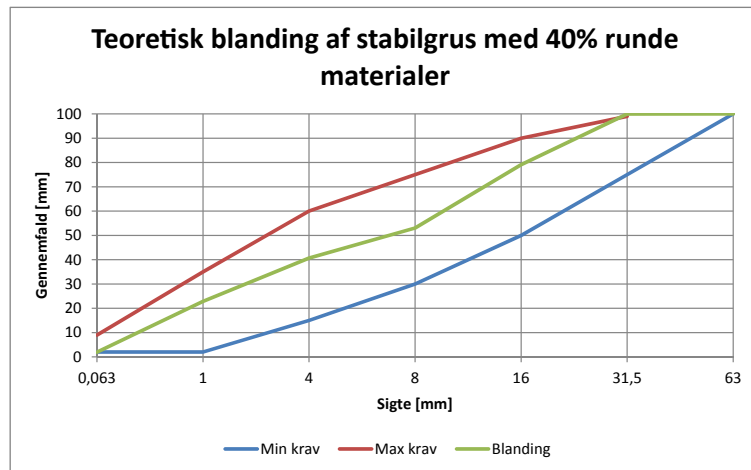
Teoretisk blanding af stabilgrus med 40% runde materialer

| Fraktion | 0/5 | 0/4 | 1/4 | 4/8 | 8/16 | 16/28 | 2/8 | 8/11 | 11/16 | 16/24 | Sum |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|
| Type | Fyltsand | Stenmel | Rund | Rund | Rund | Rund | Knust | Knust | Knust | Knust | |
| Opridelse | Bradsted | Bradsted | Thyborøn | Thyborøn | Thyborøn | Thyborøn | Bradsted | Bradsted | Bradsted | Bradsted | |
| Andele | 4 | 15 | 1 | 5 | 7 | 7 | 1 | 2 | 5 | 4 | 50,0 |
| % fordeling | 9 | 30 | 2 | 10 | 14 | 14 | 2 | 4 | 9 | 7 | 100,0 |

| Sigte mm | Kornkurve | Kornkurve | Kornkurve | Kornkurve | Kornkurve | Kornkurve | Kornkurve | Kornkurve | Kornkurve | Kornkurve | Sum |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|
| 63 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 32 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 99,6 | 100,0 |
| 16 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 83,7 | 4,7 | 100,0 | 100,0 | 97,0 | 28,8 | 79,1 |
| 8 | 99,9 | 100,0 | 100,0 | 85,8 | 4,5 | 1,2 | 100,0 | 26,7 | 4,1 | 1,2 | 53,0 |
| 4 | 95,1 | 97,8 | 91,2 | 5,6 | 0,1 | 0,8 | 25,4 | 0,8 | 0,6 | 1,0 | 40,6 |
| 2 | 83,1 | 77,5 | 16,7 | 0,3 | 0,1 | 0,8 | 2,4 | 0,6 | 0,6 | 0,9 | 31,2 |
| 1 | 70,9 | 54,1 | 1,6 | 0,1 | 0,1 | 0,7 | 1,8 | 0,6 | 0,6 | 0,9 | 22,8 |
| 0,5 | 47,6 | 37,9 | 0,3 | 0,1 | 0,1 | 0,7 | 1,6 | 0,6 | 0,6 | 0,9 | 15,9 |
| 0,25 | 13,5 | 24,0 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,7 | 1,3 | 0,6 | 0,5 | 0,8 | 8,7 |
| 0,125 | 3,6 | 12,7 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,6 | 1,0 | 0,5 | 0,5 | 0,7 | 4,4 |
| 0,063 | 1,3 | 5,5 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,5 | 0,6 | 0,3 | 0,3 | 0,5 | 1,9 |

| Kornkurveoptegning | | | |
|--------------------|----------|----------|----------|
| Sigte mm | Min krav | Max krav | Blanding |
| 0,063 | 2 | 9 | 1,9 |
| 1 | 2 | 35 | 22,8 |
| 4 | 15 | 60 | 40,6 |
| 8 | 30 | 75 | 53,0 |
| 16 | 50 | 90 | 79,1 |
| 31,5 | 75 | 99 | 100,0 |
| 63 | 100 | 100,0 | 100,0 |

| Vægtberegning | |
|--------------------------|---------|
| Kg SG II | 250 |
| Procent | 100,0 |
| Procentdel | 2,5 |
| Knuste materialer | |
| 0/5 Fyltsand | 22 kg |
| 0/4 Stenmel | 75 kg |
| 2/8 Knust | 4,5 kg |
| 8/11 Knust | 9 kg |
| 11/16 Knust | 23 kg |
| 16/24 Knust | 17,5 kg |
| Runde materialer | |
| 1/4 Rund | 4,5 kg |
| 4/8 Rund | 24,5 kg |
| 8/16 Rund | 35 kg |
| 16/28 Rund | 35 kg |



Figur B.3. Teoretisk beregning for stabilgrus med 40% runde materialer.

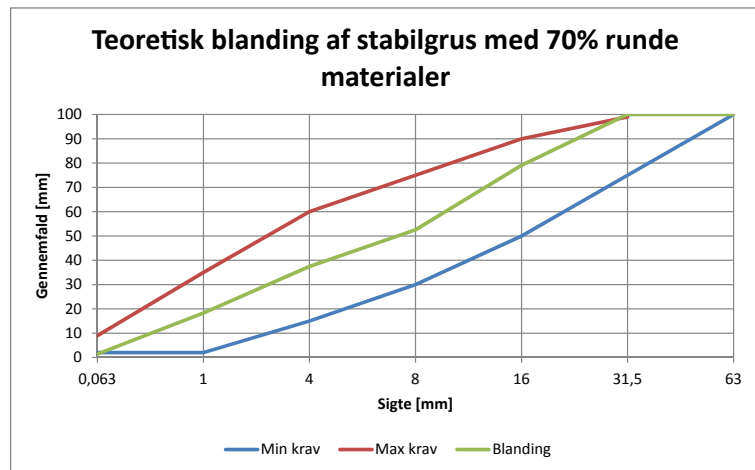
Teoretisk blanding af stabilgrus med 70% runde materialer

| Fraktion | 0/5 | 0/4 | 1/4 | 4/8 | 8/16 | 16/28 | 2/8 | 8/11 | 11/16 | 16/24 | Sum |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|
| Type | Fyldsand | Stenmel | Rund | Rund | Rund | Rund | Knust | Knust | Knust | Knust | |
| Opridelse | Bradsted | Bradsted | Thyborøn | Thyborøn | Thyborøn | Thyborøn | Bradsted | Bradsted | Bradsted | Bradsted | |
| Andele | 4 | 9 | 3 | 7 | 13 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 44,2 |
| % fordeling | 10 | 21 | 8 | 15 | 30 | 17 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100,0 |

| Sigte mm | Kornkurve | Kornkurve | Kornkurve | Kornkurve | Kornkurve | Kornkurve | Kornkurve | Kornkurve | Kornkurve | Kornkurve | Sum |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|
| 63 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 32 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 99,6 |
| 16 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 83,7 | 4,7 | 100,0 | 100,0 | 97,0 | 28,8 | 79,1 |
| 8 | 99,9 | 100,0 | 100,0 | 85,8 | 4,5 | 1,2 | 100,0 | 26,7 | 4,1 | 1,2 | 52,6 |
| 4 | 95,1 | 97,8 | 91,2 | 5,6 | 0,1 | 0,8 | 25,4 | 0,8 | 0,6 | 1,0 | 37,4 |
| 2 | 83,1 | 77,5 | 16,7 | 0,3 | 0,1 | 0,8 | 2,4 | 0,6 | 0,6 | 0,9 | 25,5 |
| 1 | 70,9 | 54,1 | 1,6 | 0,1 | 0,1 | 0,7 | 1,8 | 0,6 | 0,6 | 0,9 | 18,3 |
| 0,5 | 47,6 | 37,9 | 0,3 | 0,1 | 0,1 | 0,7 | 1,6 | 0,6 | 0,6 | 0,9 | 12,6 |
| 0,25 | 13,5 | 24,0 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,7 | 1,3 | 0,6 | 0,5 | 0,8 | 6,4 |
| 0,125 | 3,6 | 12,7 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,6 | 1,0 | 0,5 | 0,5 | 0,7 | 3,1 |
| 0,063 | 1,3 | 5,5 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,5 | 0,6 | 0,3 | 0,3 | 0,5 | 1,4 |

| Kornkurveoptegning | | | |
|--------------------|----------|----------|----------|
| Sigte mm | Min krav | Max krav | Blanding |
| 0,063 | 2 | 9 | 1,4 |
| 1 | 2 | 35 | 18,3 |
| 4 | 15 | 60 | 37,4 |
| 8 | 30 | 75 | 52,6 |
| 16 | 50 | 90 | 79,1 |
| 31,5 | 75 | 99 | 100,0 |
| 63 | 100 | 100,0 | 100,0 |

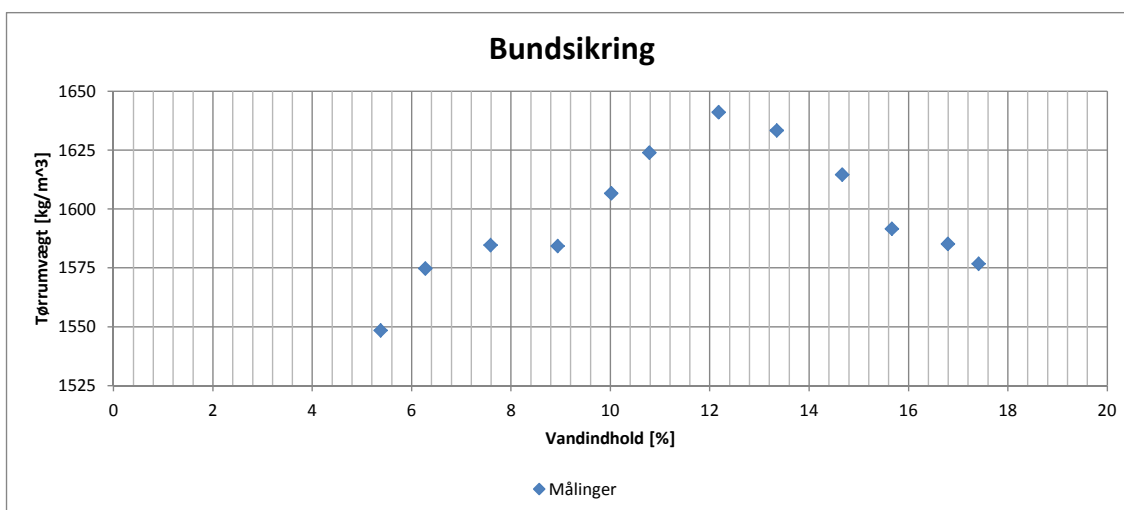
| Vægtberegning | |
|--------------------------|--------------|
| Kg SG II | 250 |
| Procent | 100,0 |
| Procentdel | 2,5 |
| Knuste materialer | |
| 0/5 Fyldsand | 23,75566 kg |
| 0/4 Stenmel | 52,0362 kg |
| 2/8 Knust | 0 kg |
| 8/11 Knust | 0 kg |
| 11/16 Knust | 0 kg |
| 16/24 Knust | 0 kg |
| Runde materialer | |
| 1/4 Rund | 19,23077 kg |
| 4/8 Rund | 37,89593 kg |
| 8/16 Rund | 75,22624 kg |
| 16/28 Rund | 41,8552 kg |



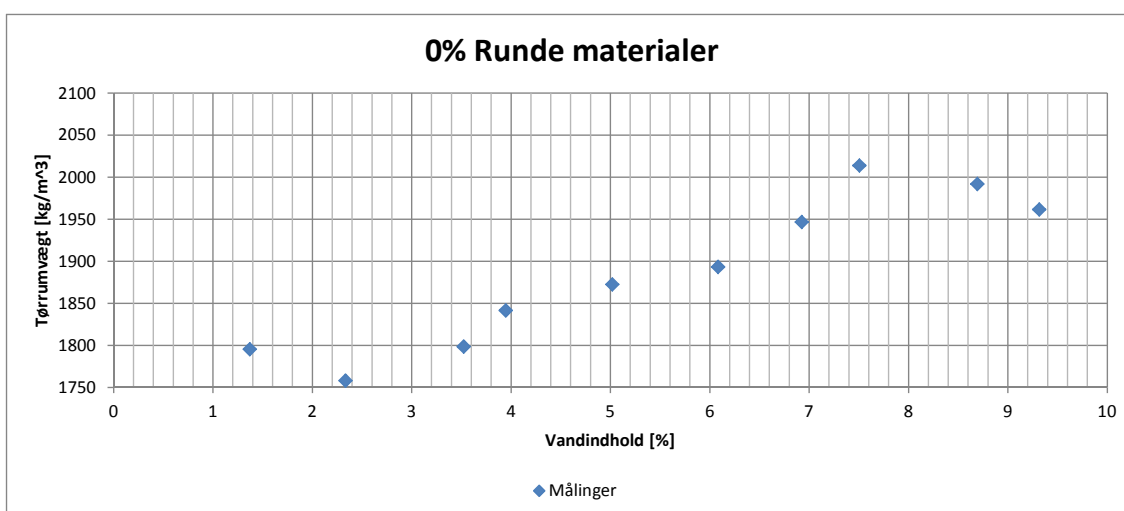
Figur B.4. Teoretisk beregning for stabilgrus med 70% runde materialer.

Standard Proctor

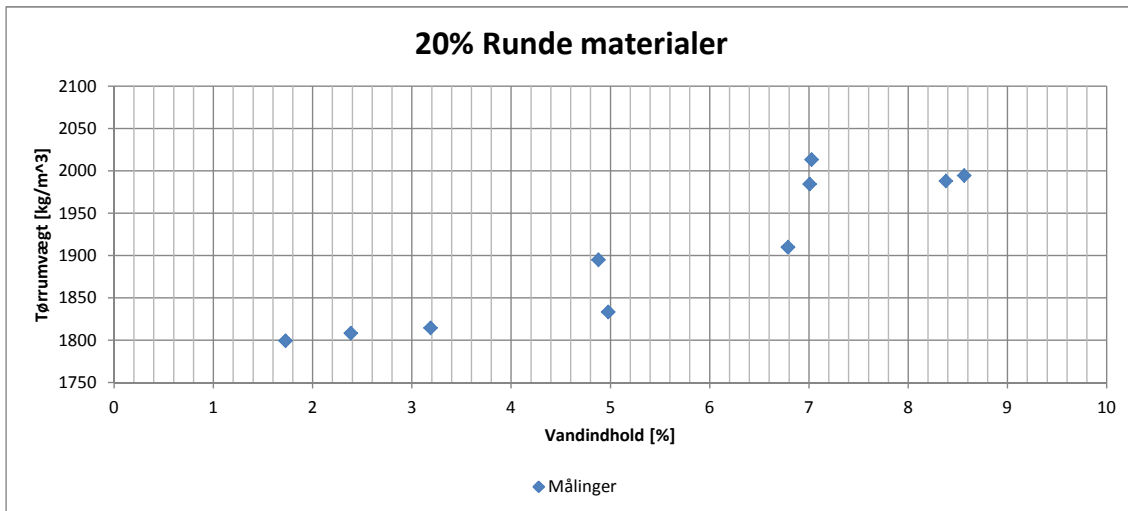
I det følgende er resultaterne fra standard proctor forsøgene optegnet. I figurene er tørdensiteten for hver måling, ved det tilhørende vandindhold plottet. Toppunktet hvor den maksimale tørdensitet er opnået, er det tilhørende vandindhold, det optimale vandindhold for det givne materiale.



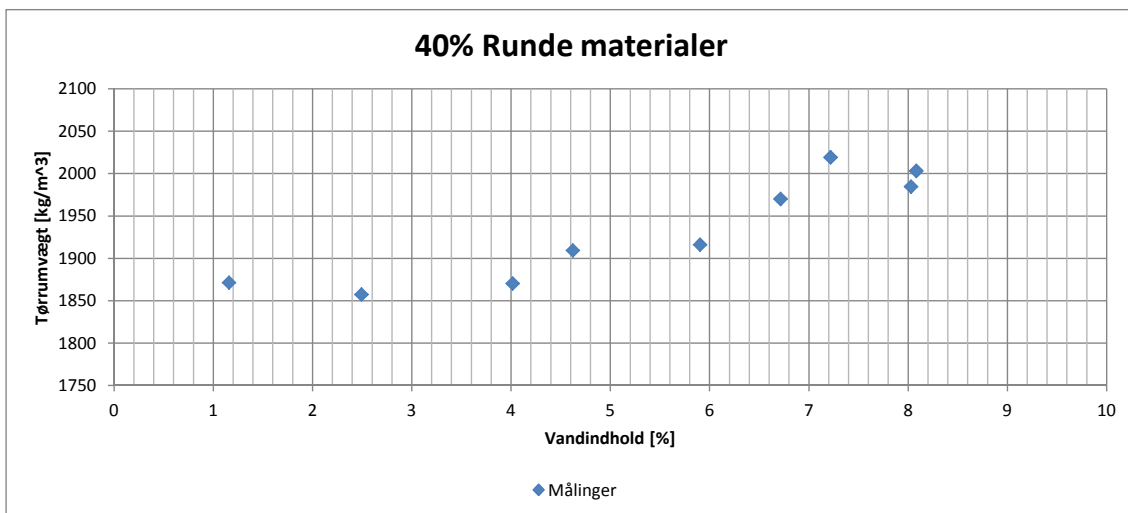
Figur C.1. Standard Proctor resultater for bundsikringsand.



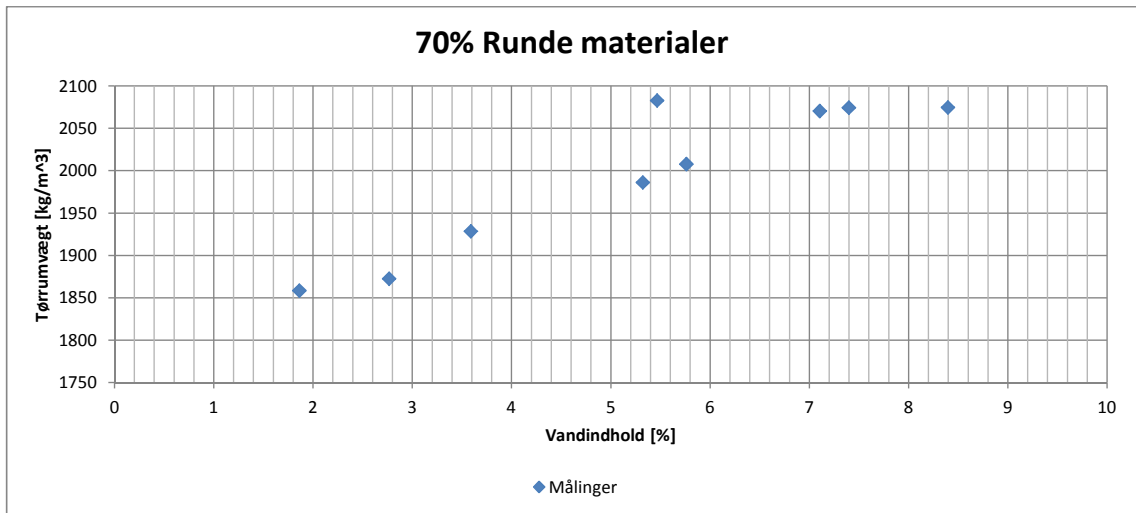
Figur C.2. Standard Proctor resultater for stabilgrus med 0% runde materialer.



Figur C.3. Standard Proctor resultater for stabilgrus med 20% runde materialer.









Figur C.4. Standard Proctor resultater for stabilgrus med 40% runde materialer.



Figur C.5. Standard Proctor resultater for stabilgrus med 70% runde materialer.

Komprimeringsvejledning

| KOMPRIMERINGS- MATERIEL | GRUPPE - OPDELING | KOHESIONSJORD | | | | FRIKTIONSJORD | | | |
|--|--|-------------------------------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------|
| | | FEDT LER | | MORÆNE LER | | UNSKORNET SAND OG GRUS | | UNSKORNET SAND OG GRUS | |
| | | MAX. TYKKELSE AF KOMPR. LAG I METER | MINDSTE ANTAL PASSAGER | MAX. TYKKELSE AF KOMPR. LAG I METER | MINDSTE ANTAL PASSAGER | MAX. TYKKELSE AF KOMPR. LAG I METER | MINDSTE ANTAL PASSAGER | MAX. TYKKELSE AF KOMPR. LAG I METER | MINDSTE ANTAL PASSAGER |
| GLATVALSET TROMLE  | LINIETRYK t/m 2,0 - 2,5 2,5 - 5,0 OVER 5,0 | 0,10 - 0,15 | 8-10 | 0,10 - 0,15 | 8-10 | 0,10 - 0,15 | 8-10 | 0,10 - 0,15 | 8-10 |
| | | 0,10 - 0,15 | 6-7 | 0,10 - 0,15 | 6-7 | 0,10 - 0,15 | 6-7 | 0,10 - 0,15 | 6-7 |
| GUMMIJULSTROMLE  | HJULTRYK t 1,0 - 2,0 2,0 - 3,0 3,0 - 4,0 OVER 4,0 | 0,10 - 0,15 | 6-8 | 0,10 - 0,15 | 6-8 | 0,10 - 0,15 | 6-8 | 0,10 - 0,15 | 6-8 |
| | | 0,15 - 0,20 | 5-6 | 0,15 - 0,20 | 5-6 | 0,15 - 0,20 | 5-6 | 0,15 - 0,20 | 5-6 |
| VIBRATIONSROMLE, SELVKØRENDE  | STATISK LINIETRYK t/m 0,5 - 1,0 1,0 - 1,5 1,5 - 2,0 OVER 2,0 | 0,10 - 0,15 | 6-8 | 0,10 - 0,15 | 6-8 | 0,10 - 0,15 | 6-8 | 0,10 - 0,15 | 6-8 |
| | | 0,15 - 0,20 | 5-6 | 0,15 - 0,20 | 5-6 | 0,15 - 0,20 | 5-6 | 0,15 - 0,20 | 5-6 |
| VIBRATIONSROMLE, BUGSERET  | STATISK LINIETRYK t/m 2,0 - 3,0 3,0 - 4,0 OVER 4,0 | 0,10 - 0,15 | 8-12 | 0,10 - 0,15 | 8-12 | 0,10 - 0,15 | 8-12 | 0,10 - 0,15 | 8-12 |
| | | 0,15 - 0,20 | 6-8 | 0,15 - 0,20 | 6-8 | 0,15 - 0,20 | 6-8 | 0,15 - 0,20 | 6-8 |
| VIBRATIONSPLADE  | STATISK TRYK t/m 0,5 - 1,0 1,0 - 1,5 1,5 - 2,0 OVER 2,0 | 0,15 - 0,20 | 5-6 | 0,15 - 0,20 | 5-6 | 0,15 - 0,20 | 5-6 | 0,15 - 0,20 | 5-6 |
| | | 0,20 - 0,25 | 5-6 | 0,20 - 0,25 | 5-6 | 0,20 - 0,25 | 5-6 | 0,20 - 0,25 | 5-6 |
| VIBRATIONSSTAMPER  | VEGT t 0,050 - 0,075 0,075 - 0,100 OVER 0,100 | 0,10 - 0,15 | 6-8 | 0,10 - 0,15 | 6-8 | 0,10 - 0,15 | 6-8 | 0,10 - 0,15 | 6-8 |
| | | 0,15 - 0,20 | 5-6 | 0,15 - 0,20 | 5-6 | 0,15 - 0,20 | 5-6 | 0,15 - 0,20 | 5-6 |

Tabel 10 Metodekrav til komprimering ved små jordarbejder. (4)

Figur D.1. Komprimeringsvejledning [Thagesen, 1984].

CPN målinger

I dette bilag, opstilles måleresultaterne fra CPN isotopsonde målingerne, udført på indbygget bundsikringssand (375 mm.), samt overflade af indbygget stabilgrus (160 mm.). Målingen af komprimeringen af stabilgrus, er udført, efter stabilgruset er indbygget oven på bundsikrings-sandet.

Måleresultaterne korrigeres, i forhold til vandindholdet. Som kontrol for vandindhold, er der efter prøvemåling med CPN, udtaget en mindre delprøve, som er nedtørret i tørreovn ved 105 grader celsius i 24 timer. Derved kan komprimeringsgraden korrigeres, i forhold til den forskel der er imellem det CPN målte vandindhold og det kontrolmålte vandindhold.

Desuden bestemmes den samlede komprimeringsgrad, i forhold til referenceforsøget ved Standard Proctor. Komprimeringsgraden bestemmes ved statistik, de fem foretagne målinger imellem.

Bundsikring CPN

Baggrundsmålinger + Måledybde

| | |
|-----------|-------|
| DS | 33482 |
| MS | 8153 |
| Dybde(mm) | 200 |

Kontrol af vandindhold, til eventuel korrigering af beregninger

| | |
|------------|--------|
| Skål Nr | 877 |
| Skål | 3,09 |
| Skål + Våd | 127,79 |
| Våd | 124,7 |
| Skål + Tør | 116,84 |
| Tør | 113,75 |
| Vand_% | 10% |

| Målinger | Center | Perferi_1 | Perferi_2 | Perferi_3 | Perferi_4 | Gennemsnit | Enhed |
|----------------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|-------|
| M_Count | 2232 | 2112 | 2225 | 2178 | 2198 | 2189 | |
| D_Count | 30572 | 33421 | 31589 | 30632 | 30452 | 31333,2 | |
| MCR | 0,27 | 0,26 | 0,27 | 0,27 | 0,27 | 0,268 | |
| DCR | 0,91 | 1,01 | 0,94 | 0,91 | 0,91 | 0,936 | |
| WD | 2055 | 1976 | 2030 | 2054 | 2058 | 2034,6 | kg/m3 |
| %_MA | 91,6 | 88,1 | 90,5 | 91,6 | 91,8 | 90,72 | % |
| %_Void | 8,2 | 11,9 | 9,5 | 8,4 | 8,2 | 9,24 | % |
| Moist | 206 | 192 | 205 | 200 | 202 | 201 | kg/m3 |
| DD | 1849 | 1784 | 1825 | 1854 | 1856 | 1833,6 | kg/m3 |
| %_Moist | 11,2 | 10,8 | 11,3 | 10,8 | 10,9 | 11 | % |
| %_PR | 112,7 | 108,7 | 111,2 | 113 | 113,1 | 111,74 | % |
| Korrigeret DD | 1874,55 | 1802,49 | 1851,74 | 1873,64 | 1877,29 | 1855,94 | kg/m3 |
| Korrigeret %PR | 114,23 | 109,83 | 112,84 | 114,17 | 114,39 | 113,09 | % |

Beregninger

| | |
|--------------------------|---------------|
| Max Tør Densitet Proctor | 1641,09 kg/m3 |
| Ny DD | 1855,94 kg/m3 |
| Komprimeringsgrad PR | 113,09 % |

Komprimering ved statistik

$$g - k \times s \geq \kappa$$

kilde: Stabilgrus AAB

| Komp ved statistik | |
|--------------------|---------------|
| K | 92,00 |
| g | 111,74 |
| n | 5,00 |
| s1 | 0,23 |
| s2 | 2,31 |
| s3 | 0,07 |
| s4 | 0,40 |
| s5 | 0,46 |
| s | 1,86 |
| k | 1,96 |
| Resultat | 108,09 |

% PR

| Korrigeret | |
|--------------------|---------------|
| Komp ved statistik | |
| K | 92,00 |
| g | 113,09 |
| n | 5,00 |
| s1 | 0,32 |
| s2 | 2,65 |
| s3 | 0,02 |
| s4 | 0,29 |
| s5 | 0,42 |
| s | 1,92 |
| k | 1,96 |
| Resultat | 109,32 |

% PR

Figur E.1. Data fra CPN målinger af bundsikringsand, samt korrigerede beregninger af komprimeringsgrad ved statistik samt vandindhold.

0% Rund CPN

Baggrundsmålinger + Måledybde

| | |
|-----------|-------|
| DS | 33146 |
| MS | 8013 |
| Dybde(mm) | 100 |

Kontrol af vandindhold, til eventuel korrigering af beregninger

| | |
|------------|--------|
| Skål Nr | 189 |
| Skål | 4,22 |
| Skål + Våd | 222,07 |
| Våd | 217,85 |
| Skål + Tør | 212,4 |
| Tør | 208,18 |
| Vand_% | 5% |

| Målinger | Center | Perferi_1 | Perferi_2 | Perferi_3 | Perferi_4 | Gennemsnit | Enhed |
|----------------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|-------|
| M_Count | 1430 | 1427 | 1557 | 1385 | 1442 | 1448,2 | |
| D_Count | 62716 | 64332 | 68008 | 62156 | 64709 | 64384,2 | |
| MCR | 0,18 | 0,18 | 0,19 | 0,17 | 0,18 | 0,18 | |
| DCR | 1,89 | 1,94 | 2,05 | 1,88 | 1,95 | 1,942 | |
| WD | 2181 | 2154 | 2094 | 2191 | 2148 | 2153,6 | kg/m3 |
| %_MA | 97,3 | 96,1 | 93,4 | 97,7 | 95,8 | 96,06 | % |
| %_Void | 2,7 | 3,9 | 6,6 | 2,3 | 4,2 | 3,94 | % |
| Moist | 116 | 116 | 131 | 111 | 117 | 118,2 | kg/m3 |
| DD | 2065 | 2039 | 1963 | 2080 | 2031 | 2035,6 | kg/m3 |
| %_Moist | 5,6 | 5,7 | 6,7 | 6,3 | 5,8 | 6,02 | % |
| %_PR | 102,6 | 101,2 | 97,5 | 103,3 | 100,8 | 101,08 | % |
| Korrigeret DD | 2084,19 | 2058,39 | 2001,05 | 2093,75 | 2052,65 | 2058,01 | kg/m3 |
| Korrigeret %PR | 103,49 | 102,20 | 99,36 | 103,96 | 101,92 | 102,19 | % |

Beregninger

| | |
|--------------------------|---------------|
| Max Tør Densitet Proctor | 2013,99 kg/m3 |
| Ny DD | 2058,01 kg/m3 |
| Komprimeringsgrad PR | 102,19 % |

Komprimering ved statistik

$$g - k \times s \geq K$$

kilde: Stabilgrus AAB

| Komp ved statistik | |
|--------------------|--------------|
| K | 92,00 |
| g | 101,08 |
| n | 5,00 |
| s1 | 0,58 |
| s2 | 0,00 |
| s3 | 3,20 |
| s4 | 1,23 |
| s5 | 0,02 |
| s | 2,24 |
| k | 1,96 |
| Resultat | 96,68 |

% PR

| Korrigeret | |
|-----------------|--------------|
| K | 92,00 |
| g | 102,19 |
| n | 5,00 |
| s1 | 0,42 |
| s2 | 0,00 |
| s3 | 2,00 |
| s4 | 0,79 |
| s5 | 0,02 |
| s | 1,80 |
| k | 1,96 |
| Resultat | 98,66 |

% PR

Figur E.2. Data fra CPN målinger af stabilgrus med 0% runde materialer, samt korrigerede beregninger af komprimeringsgrad ved statistik samt vandindhold.

20% Rund CPN

Baggrundsmålinger + Måledybde

| | |
|-----------|-------|
| DS | 33482 |
| MS | 8153 |
| Dybde(mm) | 100 |

Kontrol af vandindhold, til eventuel korrigering af beregninger

| | |
|------------|--------|
| Skål Nr | 718 |
| Skål | 3,1 |
| Skål + Våd | 199,02 |
| Våd | 195,92 |
| Skål + Tør | 193,62 |
| Tør | 190,52 |
| Vand_% | 3% |

| Målinger | Center | Perferi_1 | Perferi_2 | Perferi_3 | Perferi_4 | Gennemsnit | Enhed |
|----------------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------|-------|
| M_Count | 1247 | 1212 | 1269 | 1313 | 1249 | 1258 | |
| D_Count | 63618 | 66342 | 65649 | 64351 | 65383 | 65068,6 | |
| MCR | 0,15 | 0,15 | 0,16 | 0,16 | 0,15 | 0,154 | |
| DCR | 1,9 | 1,98 | 1,96 | 1,92 | 1,95 | 1,942 | |
| WD | 2177 | 2132 | 2143 | 2165 | 2148 | 2153 kg/m3 | |
| %_MA | 97,1 | 95,1 | 95,6 | 96,5 | 95,8 | 96,02 % | |
| %_Void | 2,9 | 7,9 | 4,4 | 3,5 | 4,2 | 4,58 % | |
| Moist | 92 | 88 | 94 | 99 | 92 | 93 kg/m3 | |
| DD | 2085 | 2044 | 2049 | 2065 | 2056 | 2059,8 kg/m3 | |
| %_Moist | 4,4 | 4,3 | 4,6 | 4,8 | 4,5 | 4,52 % | |
| %_PR | 103,6 | 101,6 | 101,8 | 102,6 | 102,1 | 102,34 % | |
| Korrigeret DD | 2117,00 | 2073,24 | 2083,94 | 2105,33 | 2088,80 | 2093,67 kg/m3 | |
| Korrigeret %PR | 105,15 | 102,98 | 103,51 | 104,57 | 103,75 | 103,99 % | |

Beregninger

| | |
|--------------------------|---------------|
| Max Tør Densitet Proctor | 2013,26 kg/m3 |
| Ny DD | 2093,67 kg/m3 |
| Komprimeringsgrad PR | 103,99 % |

Komprimering ved statistik

$$g - k \times s \geq \kappa$$

kilde: Stabilgrus AAB

| Komp ved statistik | |
|--------------------|--------------------|
| K | 92,00 |
| g | 102,34 |
| n | 5,00 |
| s1 | 0,40 |
| s2 | 0,14 |
| s3 | 0,07 |
| s4 | 0,02 |
| s5 | 0,01 |
| s | 0,80 |
| k | 1,96 |
| Resultat | 100,77 % PR |

| Korrigeret | |
|--------------------|--------------------|
| Komp ved statistik | |
| K | 92,00 |
| g | 103,99 |
| n | 5,00 |
| s1 | 0,34 |
| s2 | 0,26 |
| s3 | 0,06 |
| s4 | 0,08 |
| s5 | 0,01 |
| s | 0,87 |
| k | 1,96 |
| Resultat | 102,30 % PR |

Figur E.3. Data fra CPN målinger af stabilgrus med 20% runde materialer, samt korrigerede beregninger af komprimeringsgrad ved statistik samt vandindhold.

40% Rund CPN

Baggrundsmålinger + Måledybde

| | |
|-----------|-------|
| DS | 33482 |
| MS | 8153 |
| Dybde(mm) | 100 |

Kontrol af vandindhold, til eventuel korrigering af beregninger

| | |
|------------|--------|
| Skål Nr | 531 |
| Skål | 3,05 |
| Skål + Våd | 159,69 |
| Våd | 156,64 |
| Skål + Tør | 152,89 |
| Tør | 149,84 |
| Vand_% | 5% |

Målinger

| | Center | Perferi_1 | Perferi_2 | Perferi_3 | Perferi_4 | Gennemsnit | Enhed |
|----------------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|-------|
| M_Count | 1441 | 1392 | 1369 | 1376 | 1439 | 1403,4 | |
| D_Count | 59878 | 60260 | 64143 | 58850 | 58765 | 60379,2 | |
| MCR | 0,18 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,18 | 0,174 | |
| DCR | 1,79 | 1,8 | 1,92 | 1,76 | 1,76 | 1,806 | |
| WD | 2241 | 2234 | 2168 | 2259 | 2260 | 2232,4 | kg/m3 |
| %_MA | 99,9 | 99,6 | 96,7 | 100,7 | 100,8 | 99,54 | % |
| %_Void | 0,1 | 0,4 | 3,3 | -0,7 | -0,8 | 0,46 | % |
| Moist | 114 | 109 | 106 | 107 | 114 | 110 | kg/m3 |
| DD | 2126 | 2125 | 2062 | 2152 | 2146 | 2122,2 | kg/m3 |
| %_Moist | 5,4 | 5,1 | 5,1 | 5 | 5,3 | 5,18 | % |
| %_PR | 105,3 | 105,3 | 102,1 | 106,6 | 106,3 | 105,12 | % |
| Korrigeret DD | 2143,72 | 2137,02 | 2073,89 | 2160,94 | 2161,89 | 2135,49 | kg/m3 |
| Korrigeret %PR | 106,16 | 105,82 | 102,70 | 107,01 | 107,06 | 105,75 | % |

Beregninger

| | |
|--------------------------|---------------|
| Max Tør Densitet Proctor | 2019,41 kg/m3 |
| Ny DD | 2135,49 kg/m3 |
| Komprimeringsgrad PR | 105,75 % |

Komprimering ved statistik

$$g - k \times s \geq K$$

kilde: Stabilgrus AAB

| Komp ved statistik | |
|--------------------|--------------------|
| K | 92,00 |
| g | 105,12 |
| n | 5,00 |
| s1 | 0,01 |
| s2 | 0,01 |
| s3 | 2,28 |
| s4 | 0,55 |
| s5 | 0,35 |
| s | 1,79 |
| k | 1,96 |
| Resultat | 101,62 % PR |

| Korrigeret | |
|--------------------|--------------------|
| Komp ved statistik | |
| K | 92,00 |
| g | 105,75 |
| n | 5,00 |
| s1 | 0,04 |
| s2 | 0,00 |
| s3 | 2,33 |
| s4 | 0,40 |
| s5 | 0,43 |
| s | 1,79 |
| k | 1,96 |
| Resultat | 102,25 % PR |

Figur E.4. Data fra CPN målinger af stabilgrus med 40% runde materialer, samt korrigerede beregninger af komprimeringsgrad ved statistik samt vandindhold.

70% Rund CPN

Baggrundsmålinger + Måledybde

| | |
|-----------|-------|
| DS | 33482 |
| MS | 8153 |
| Dybde(mm) | 100 |

Kontrol af vandindhold, til eventuel korrigering af beregninger

| | |
|------------|--------|
| Skål Nr | 872 |
| Skål | 3,14 |
| Skål + Våd | 208,63 |
| Våd | 205,49 |
| Skål + Tør | 203,34 |
| Tør | 200,2 |
| Vand_% | 3% |

| Målinger | Center | Perferi_1 | Perferi_2 | Perferi_3 | Perferi_4 | Gennemsnit | Enhed |
|----------------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|-------|
| M_Count | 1151 | 1129 | 1112 | 1140 | 1135 | 1133,4 | |
| D_Count | 60882 | 66128 | 68171 | 63034 | 62703 | 64183,6 | |
| MCR | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | |
| DCR | 1,82 | 1,98 | 2,04 | 1,88 | 1,87 | 1,918 | |
| WD | 2223 | 2136 | 2103 | 2187 | 2192 | 2168,2 | kg/m3 |
| %_MA | 99,1 | 95,2 | 93,8 | 97,5 | 97,8 | 96,68 | % |
| %_Void | 0,9 | 4,8 | 6,2 | 2,5 | 2,2 | 3,32 | % |
| Moist | 81 | 78 | 76 | 79 | 79 | 78,6 | kg/m3 |
| DD | 2143 | 2057 | 2027 | 2107 | 2113 | 2089,4 | kg/m3 |
| %_Moist | 3,8 | 3,8 | 3,8 | 3,8 | 3,7 | 3,78 | % |
| %_PR | 102,9 | 98,8 | 97,3 | 101,2 | 101,5 | 100,34 | % |
| Korrigeret DD | 2165,78 | 2081,02 | 2048,87 | 2130,71 | 2135,58 | 2112,39 | kg/m3 |
| Korrigeret %PR | 103,99 | 99,92 | 98,38 | 102,30 | 102,54 | 101,42 | % |

Beregninger

| | |
|--------------------------|---------------|
| Max Tør Densitet Proctor | 2082,71 kg/m3 |
| Ny DD | 2112,39 kg/m3 |
| Komprimeringsgrad PR | 101,42 % |

Komprimering ved statistik

$$g - k \times s \geq k$$

kilde: Stabilgrus AAB

| Komp ved statistik | |
|--------------------|--------------|
| K | 92,00 |
| g | 100,34 |
| n | 5,00 |
| s1 | 1,64 |
| s2 | 0,59 |
| s3 | 2,31 |
| s4 | 0,18 |
| s5 | 0,34 |
| s | 2,25 |
| k | 1,96 |
| Resultat | 95,93 |

% PR

| Korrigeret | |
|--------------------|--------------|
| Komp ved statistik | |
| K | 92,00 |
| g | 101,42 |
| n | 5,00 |
| s1 | 1,64 |
| s2 | 0,57 |
| s3 | 2,33 |
| s4 | 0,19 |
| s5 | 0,31 |
| s | 2,24 |
| k | 1,96 |
| Resultat | 97,03 |

% PR

Figur E.5. Data fra CPN målinger af stabilgrus med 70% runde materialer, samt korrigerede beregninger af komprimeringsgrad ved statistik samt vandindhold.

Faldlodsmålinger

Rådata fra faldlodsmålingerne er oplistet i det følgende. Der er rådata fra hver faldlodsmåling af såvel stabilgrus, som bundsikringsandet, mellem indbygning af stabilgrus med forskelligt indhold af runde materialer.

Der er foretaget 20 faldlodsmålinger mellem hver indbygning og som endelig dokumentation af den færdigindbyggede stabilgrus overflade E-modul. Der er foretaget 10 målinger med henholdsvis lav og høj faldhøjde. Det er illustreret for hver 10 målinger, hvilke tre målinger, hvor gennemsnittet af E-modulet udregnes som resultat. De tre målinger med mindst spredning i nedsynkningen, som det gennemsnitlige E-modul udregnes ud fra, er illustreret på hver figur.

De gule markeringer, er de tre resultatmålinger, for lav faldhøjde. De orange markeringer, er tilsvarende de tre resultatmålinger for høj faldhøjde.

| Prøvetagning | 0% Rund | | | f | v [-] |
|--------------|------------|---------|-----------|-----------|------------|
| Lag | Stabilgrus | | | 2 | 0,35 |
| | Pladetryk | E-modul | Nedsynkni | Faldhøjde | radius (a) |
| Prøve nr.: | [kPa] | [Mpa] | [my] | [m] | [m] |
| 1 | 209,96 | 93,631 | 393,54 | 0,395 | 0,1 |
| 2 | 204,85 | 100,37 | 358,18 | 0,395 | 0,1 |
| 3 | 204,43 | 98,477 | 364,32 | 0,395 | 0,1 |
| 4 | 202,38 | 100,62 | 353 | 0,395 | 0,1 |
| 5 | 206,32 | 105,83 | 342,16 | 0,395 | 0,1 |
| 6 | 205,65 | 106,9 | 337,63 | 0,395 | 0,1 |
| 7 | 205,57 | 106,12 | 339,97 | 0,395 | 0,1 |
| 8 | 208,19 | 108,63 | 336,35 | 0,395 | 0,1 |
| 9 | 206,17 | 109,39 | 330,77 | 0,395 | 0,1 |
| 10 | 208,27 | 111,65 | 327,36 | 0,395 | 0,1 |
| 11 | 299,53 | 121,82 | 431,51 | 0,636 | 0,1 |
| 12 | 295,25 | 122,65 | 422,48 | 0,636 | 0,1 |
| 13 | 294,1 | 123,48 | 418,02 | 0,636 | 0,1 |
| 14 | 294,58 | 129,2 | 400,13 | 0,636 | 0,1 |
| 15 | 295,65 | 129,82 | 399,69 | 0,636 | 0,1 |
| 16 | 293,3 | 132,13 | 389,57 | 0,636 | 0,1 |
| 17 | 293,53 | 127,05 | 405,48 | 0,636 | 0,1 |
| 18 | 296,17 | 131,22 | 396,12 | 0,636 | 0,1 |
| 19 | 296,67 | 130,23 | 399,79 | 0,636 | 0,1 |
| 20 | 292,96 | 133,55 | 384,99 | 0,636 | 0,1 |

Figur F.1. Rådata fra faldlodsmålinger på overflade af indbygget stabilgrus med 0% runde materialer.

| Prøvetagning | | 20% Rund | | | f | v [-] |
|--------------|-----------|------------|-----------|-----------|------------|-------|
| Lag | | Stabilgrus | | | 2 | 0,35 |
| | Pladetryk | E-modul | Nedsynkni | Faldhøjde | radius (a) | |
| Prøve nr.: | [kPa] | [Mpa] | [my] | [m] | [m] | |
| 1 | 196,9 | 121,09 | 285,38 | 0,395 | 0,1 | |
| 2 | 198,35 | 126,56 | 275,04 | 0,395 | 0,1 | |
| 3 | 196,95 | 127,36 | 271,4 | 0,395 | 0,1 | |
| 4 | 198,52 | 130,36 | 267,26 | 0,395 | 0,1 | |
| 5 | 193,71 | 129,45 | 262,63 | 0,395 | 0,1 | |
| 6 | 197,57 | 133,11 | 260,5 | 0,395 | 0,1 | |
| 7 | 197,22 | 129,67 | 266,92 | 0,395 | 0,1 | |
| 8 | 197,25 | 132,49 | 261,28 | 0,395 | 0,1 | |
| 9 | 197,02 | 132,19 | 261,59 | 0,395 | 0,1 | |
| 10 | 196,38 | 131,21 | 262,67 | 0,395 | 0,1 | |
| 11 | 296,79 | 143,22 | 363,68 | 0,636 | 0,1 | |
| 12 | 297,02 | 145,68 | 357,82 | 0,636 | 0,1 | |
| 13 | 295,82 | 145,86 | 355,93 | 0,636 | 0,1 | |
| 14 | 295,37 | 146,16 | 354,66 | 0,636 | 0,1 | |
| 15 | 299,06 | 150,57 | 348,57 | 0,636 | 0,1 | |
| 16 | 296,27 | 149,34 | 348,16 | 0,636 | 0,1 | |
| 17 | 297,12 | 148,59 | 350,92 | 0,636 | 0,1 | |
| 18 | 297,42 | 150,12 | 347,12 | 0,636 | 0,1 | |
| 19 | 290,11 | 142,21 | 358,02 | 0,636 | 0,1 | |
| 20 | 299,24 | 147,12 | 356,95 | 0,636 | 0,1 | |

Figur F.2. Rådata fra faldlodsmålinger på overflade af indbygget stabilgrus med 20% runde materialer.

| Prøvetagning | | 40% Rund | | | f | v [-] |
|--------------|-----------|------------|-----------|-----------|------------|-------|
| Lag | | Stabilgrus | | | 2 | 0,35 |
| | Pladetryk | E-modul | Nedsynkni | Faldhøjde | radius (a) | |
| Prøve nr.: | [kPa] | [Mpa] | [my] | [m] | [m] | |
| 1 | 201,98 | 120,81 | 293,43 | 0,395 | 0,1 | |
| 2 | 199,69 | 123,39 | 284,02 | 0,395 | 0,1 | |
| 3 | 199,49 | 122,68 | 385,39 | 0,395 | 0,1 | |
| 4 | 198,3 | 125,56 | 277,17 | 0,395 | 0,1 | |
| 5 | 200,79 | 126,37 | 278,85 | 0,395 | 0,1 | |
| 6 | 199,72 | 128,1 | 273,62 | 0,395 | 0,1 | |
| 7 | 198,37 | 128,67 | 270,57 | 0,395 | 0,1 | |
| 8 | 199,64 | 128,8 | 272,03 | 0,395 | 0,1 | |
| 9 | 200,86 | 130,64 | 269,84 | 0,395 | 0,1 | |
| 10 | 198,59 | 127,82 | 272,68 | 0,395 | 0,1 | |
| 11 | 296,62 | 129,39 | 402,32 | 0,636 | 0,1 | |
| 12 | 295,8 | 137,46 | 377,66 | 0,636 | 0,1 | |
| 13 | 294,2 | 141,57 | 364,72 | 0,636 | 0,1 | |
| 14 | 298,69 | 144,7 | 362,27 | 0,636 | 0,1 | |
| 15 | 296,67 | 145,61 | 357,58 | 0,636 | 0,1 | |
| 16 | 298,46 | 145,72 | 359,45 | 0,636 | 0,1 | |
| 17 | 298,24 | 146,83 | 356,47 | 0,636 | 0,1 | |
| 18 | 293,38 | 147,57 | 348,9 | 0,636 | 0,1 | |
| 19 | 296,52 | 149,75 | 347,51 | 0,636 | 0,1 | |
| 20 | 295,37 | 146,34 | 354,23 | 0,636 | 0,1 | |

Figur F.3. Rådata fra faldlodsmålinger på overflade af indbygget stabilgrus med 40% runde materialer.

| Prøvetagning | 70% Rund | | | f | v [-] |
|--------------|------------|---------|-----------|-----------|------------|
| Lag | Stabilgrus | | | 2 | 0,35 |
| | Pladetryk | E-modul | Nedsynkni | Faldhøjde | radius (a) |
| Prøve nr.: | [kPa] | [Mpa] | [my] | [m] | [m] |
| 1 | 200,61 | 115,04 | 306,05 | 0,395 | 0,1 |
| 2 | 200,64 | 128,53 | 273,96 | 0,395 | 0,1 |
| 3 | 199,62 | 132,66 | 264,09 | 0,395 | 0,1 |
| 4 | 199,44 | 135,46 | 258,39 | 0,395 | 0,1 |
| 5 | 199,74 | 128,25 | 273,32 | 0,395 | 0,1 |
| 6 | 200,31 | 134,58 | 261,23 | 0,395 | 0,1 |
| 7 | 198,07 | 136,23 | 255,16 | 0,395 | 0,1 |
| 8 | 198,84 | 136,67 | 255,34 | 0,395 | 0,1 |
| 9 | 198,4 | 141,98 | 245,23 | 0,395 | 0,1 |
| 10 | 199,32 | 138,8 | 252,01 | 0,395 | 0,1 |
| 11 | 291,98 | 135,62 | 377,84 | 0,636 | 0,1 |
| 12 | 296,07 | 146,65 | 354,31 | 0,636 | 0,1 |
| 13 | 297,07 | 151,38 | 344,4 | 0,636 | 0,1 |
| 14 | 299,19 | 154,92 | 338,93 | 0,636 | 0,1 |
| 15 | 296,2 | 152,44 | 340,99 | 0,636 | 0,1 |
| 16 | 299,34 | 154,06 | 340,99 | 0,636 | 0,1 |
| 17 | 299,16 | 158,05 | 332,19 | 0,636 | 0,1 |
| 18 | 298,56 | 155,32 | 337,35 | 0,636 | 0,1 |
| 19 | 299,19 | 155,33 | 338,3 | 0,636 | 0,1 |
| 20 | 300,11 | 157,82 | 333,82 | 0,636 | 0,1 |

Figur F.4. Rådata fra faldlodsmålinger på overflade af indbygget stabilgrus med 70% runde materialer.

| Prøvetagning | Test Bundskr/0 | | | f | v [-] |
|--------------|----------------|---------|-----------|-----------|------------|
| Lag | Bundsikring | | | 2 | 0,35 |
| | Pladetryk | E-modul | Nedsynkni | Faldhøjde | radius (a) |
| Prøve nr.: | [kPa] | [Mpa] | [my] | [m] | [m] |
| 1 | 102,19 | 89,003 | 302,25 | 0,46 | 0,15 |
| 2 | 102,1 | 92,923 | 289,25 | 0,46 | 0,15 |
| 3 | 101,78 | 95,487 | 280,59 | 0,46 | 0,15 |
| 4 | 101,44 | 97,576 | 273,66 | 0,46 | 0,15 |
| 5 | 101,99 | 97,989 | 274 | 0,46 | 0,15 |
| 6 | 101,94 | 99,496 | 269,73 | 0,46 | 0,15 |
| 7 | 101,78 | 99,787 | 268,5 | 0,46 | 0,15 |
| 8 | 101,62 | 100,73 | 265,6 | 0,46 | 0,15 |
| 9 | 101,53 | 101,07 | 264,47 | 0,46 | 0,15 |
| 10 | 101,98 | 101,1 | 265,53 | 0,46 | 0,15 |
| 11 | 150,31 | 104,66 | 378,05 | 0,72 | 0,15 |
| 12 | 149,61 | 105,42 | 373,59 | 0,72 | 0,15 |
| 13 | 151,27 | 106,63 | 373,45 | 0,72 | 0,15 |
| 14 | 151,01 | 106,83 | 372,09 | 0,72 | 0,15 |
| 15 | 151,43 | 107,61 | 370,42 | 0,72 | 0,15 |
| 16 | 150,78 | 108,77 | 366,61 | 0,72 | 0,15 |
| 17 | 150,97 | 108,76 | 365,41 | 0,72 | 0,15 |
| 18 | 149,69 | 109,1 | 361,85 | 0,72 | 0,15 |
| 19 | 149,66 | 108,88 | 361,87 | 0,72 | 0,15 |
| 20 | 150,58 | 109,14 | 363,21 | 0,72 | 0,15 |

Figur F.5. Rådata fra faldlodsmålinger på overflade af indbygget bundsikringsand.

| Prøvetagning | | Test 0/20 | | | f | v [-] |
|--------------|-----------|-------------|-----------|-----------|------------|-------|
| Lag | | Bundsikring | | | 2 | 0,35 |
| | Pladetryk | E-modul | Nedsynkni | Faldhøjde | radius (a) | |
| Prøve nr.: | [kPa] | [Mpa] | [my] | [m] | [m] | |
| 1 | 99,297 | 89,322 | 292,65 | 0,46 | 0,15 | |
| 2 | 100,09 | 98,157 | 268,45 | 0,46 | 0,15 | |
| 3 | 100,66 | 99,934 | 265,16 | 0,46 | 0,15 | |
| 4 | 100,25 | 101,09 | 261,07 | 0,46 | 0,15 | |
| 5 | 100,6 | 102,64 | 258,03 | 0,46 | 0,15 | |
| 6 | 101,26 | 102,96 | 258,89 | 0,46 | 0,15 | |
| 7 | 100,66 | 103,73 | 255,45 | 0,46 | 0,15 | |
| 8 | 100,59 | 104,66 | 253,01 | 0,46 | 0,15 | |
| 9 | 101,37 | 106,49 | 250,6 | 0,46 | 0,15 | |
| 10 | 100,59 | 108,85 | 243,28 | 0,46 | 0,15 | |
| 11 | 147,76 | 105,14 | 369,97 | 0,72 | 0,15 | |
| 12 | 151,02 | 107,97 | 368,21 | 0,72 | 0,15 | |
| 13 | 149,76 | 108,3 | 364,05 | 0,72 | 0,15 | |
| 14 | 150,07 | 109,04 | 362,32 | 0,72 | 0,15 | |
| 15 | 149,47 | 109,91 | 358 | 0,72 | 0,15 | |
| 16 | 149,47 | 108,61 | 362,27 | 0,72 | 0,15 | |
| 17 | 147,95 | 105,98 | 367,48 | 0,72 | 0,15 | |
| 18 | 148,96 | 107,47 | 364,87 | 0,72 | 0,15 | |
| 19 | 150,97 | 110,34 | 360,17 | 0,72 | 0,15 | |
| 20 | 149,16 | 107,47 | 365,37 | 0,72 | 0,15 | |

Figur E.6. Rådata fra faldlodsmålinger på overflade af indbygget bundsikringssand, mellem indbygning af stabilgrus med 0% og 20% runde materialer.

| Prøvetagning | | Test 20/40 | | | f | v [-] |
|--------------|-----------|-------------|-----------|-----------|------------|-------|
| Lag | | Bundsikring | | | 2 | 0,35 |
| | Pladetryk | E-modul | Nedsynkni | Faldhøjde | radius (a) | |
| Prøve nr.: | [kPa] | [Mpa] | [my] | [m] | [m] | |
| 1 | 97,99 | 70,078 | 368,1 | 0,46 | 0,15 | |
| 2 | 99,231 | 93,091 | 280,61 | 0,46 | 0,15 | |
| 3 | 98,743 | 96,337 | 269,82 | 0,46 | 0,15 | |
| 4 | 98,788 | 97,121 | 267,77 | 0,46 | 0,15 | |
| 5 | 98,61 | 100,74 | 257,68 | 0,46 | 0,15 | |
| 6 | 99,452 | 101,86 | 257,03 | 0,46 | 0,15 | |
| 7 | 98,455 | 101,79 | 254,62 | 0,46 | 0,15 | |
| 8 | 147,37 | 107,74 | 360,09 | 0,72 | 0,15 | |
| 9 | 148,2 | 103,86 | 375,63 | 0,72 | 0,15 | |
| 10 | 150 | 107,63 | 366,87 | 0,72 | 0,15 | |
| 11 | 149,97 | 110,4 | 357,6 | 0,72 | 0,15 | |
| 12 | 149,59 | 109,32 | 360,22 | 0,72 | 0,15 | |
| 13 | 151,37 | 111,31 | 358 | 0,72 | 0,15 | |
| 14 | 150,56 | 112,29 | 352,96 | 0,72 | 0,15 | |
| 15 | 150,64 | 113,25 | 350,15 | 0,72 | 0,15 | |
| 16 | 149,06 | 112,4 | 349,1 | 0,72 | 0,15 | |
| 17 | | | | | 0,15 | |
| 18 | | | | | 0,15 | |
| 19 | | | | | 0,15 | |
| 20 | | | | | 0,15 | |

Figur E.7. Rådata fra faldlodsmålinger på overflade af indbygget bundsikringssand, mellem indbygning af stabilgrus med 20% og 40% runde materialer.

| Prøvetagning | Test 40/70 | | | f | v [-] |
|--------------|-------------|---------|-----------|-----------|------------|
| Lag | Bundsikring | | | 2 | 0,35 |
| | Pladetryk | E-modul | Nedsynkni | Faldhøjde | radius (a) |
| Prøve nr.: | [kPa] | [Mpa] | [my] | [m] | [m] |
| 1 | 99,995 | 87,295 | 301,55 | 0,46 | 0,15 |
| 2 | 99,441 | 84,755 | 308,86 | 0,46 | 0,15 |
| 3 | 98,954 | 77,385 | 336,62 | 0,46 | 0,15 |
| 4 | 98,71 | 83,621 | 310,75 | 0,46 | 0,15 |
| 5 | 100,79 | 87,996 | 301,53 | 0,46 | 0,15 |
| 6 | 100,23 | 87,521 | 301,47 | 0,46 | 0,15 |
| 7 | 97,215 | 57,473 | 445,28 | 0,46 | 0,15 |
| 8 | 98,655 | 81,568 | 318,39 | 0,46 | 0,15 |
| 9 | 100,04 | 89,126 | 295,49 | 0,46 | 0,15 |
| 10 | 100,59 | 91,326 | 289,96 | 0,46 | 0,15 |
| 11 | 100,21 | 93,155 | 283,17 | 0,46 | 0,15 |
| 12 | 98,976 | 94,082 | 276,94 | 0,46 | 0,15 |
| 13 | 99,22 | 94,11 | 277,54 | 0,46 | 0,15 |
| 14 | 99,153 | 93,059 | 280,49 | 0,46 | 0,15 |
| 15 | 154,24 | 94,229 | 430,91 | 0,72 | 0,15 |
| 16 | 155,74 | 96,487 | 424,9 | 0,72 | 0,15 |
| 17 | 157,13 | 97,846 | 422,75 | 0,72 | 0,15 |
| 18 | 157,81 | 99,383 | 418 | 0,72 | 0,15 |
| 19 | 156,32 | 98,704 | 416,92 | 0,72 | 0,15 |
| 20 | 156,58 | 99,589 | 413,89 | 0,72 | 0,15 |
| 21 | 158,23 | 101,65 | 409,75 | 0,72 | 0,15 |
| 22 | 158,74 | 100,13 | 417,1 | 0,72 | 0,15 |
| 23 | 155,48 | 101,65 | 402,67 | 0,72 | 0,15 |
| 24 | 156,22 | 103,9 | 395,81 | 0,72 | 0,15 |

Figur E.8. Rådata fra faldlodsmålinger på overflade af indbygget bundsikringsand, mellem indbygning af stabilgrus med 40% og 70% runde materialer.

Nonlinearitetsberegning

Dette bilag omhandler beregningerne for nonlinearitet. I beregningerne er E_0 fastsat til de målinger, der er foretaget på bundsikringslaget mellem hver indbygning af stabilgrus. C_0 er for, hver måling fastsat til at være den målte værdi på toppen af stabilgruslaget. Ved at isolere i forhold til n , fremkommer nonlineariteten for hver måling, som indsættes i figur 4.22 på side 57.

Nonlinearitet

0% 200 kPa

$$101 = 94 \left(\frac{0.2}{200} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = -0.01039784006]]$$

$$101 = 100 \left(\frac{0.2}{200} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = -0.001440457928]]$$

$$101 = 98 \left(\frac{0.2}{200} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = -0.004365099363]]$$

$$101 = 101 \left(\frac{0.2}{200} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.]]$$

$$101 = 106 \left(\frac{0.2}{200} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.006994830494]]$$

$$101 = 107 \left(\frac{0.2}{200} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.008354134634]]$$

$$101 = 106 \left(\frac{0.2}{200} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.006994830494]]$$

$$101 = 109 \left(\frac{0.2}{200} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.01103504139]]$$

$$101 = 109 \left(\frac{0.2}{200} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.01103504139]]$$

$$101 = 112 \left(\frac{0.2}{200} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.01496554963]]$$

0% 300 kPa

$$101 = 122 \left(\frac{0.3}{300} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.02734615230]]$$

$$101 = 123 \left(\frac{0.3}{300} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.02852791255]]$$

$$101 = 123 \left(\frac{0.3}{300} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.02852791255]]$$

$$101 = 129 \left(\frac{0.3}{300} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.03542277884]]$$

$$101 = 130 \left(\frac{0.3}{300} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.03654065951]]$$

$$101 = 132 \left(\frac{0.3}{300} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.03875085247]]$$

$$101 = 127 \left(\frac{0.3}{300} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.03316078239]]$$

$$101 = 131 \left(\frac{0.3}{300} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.03764997396]]$$

$$101 = 130 \left(\frac{0.3}{300} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.03654065951]]$$

$$101 = 134 \left(\frac{0.3}{300} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.04092780819]]$$

Figur G.1. Nonlinearitetsberegning for stabilgrus med 0% runde materialer.

20% 200 kPa

$$102 = 121 \left(\frac{0.2}{200} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.02472839952]]$$

$$102 = 127 \left(\frac{0.2}{200} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.03173451640]]$$

$$102 = 127 \left(\frac{0.2}{200} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.03173451640]]$$

$$102 = 130 \left(\frac{0.2}{200} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.03511439352]]$$

$$102 = 129 \left(\frac{0.2}{200} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.03399651285]]$$

$$102 = 133 \left(\frac{0.2}{200} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.03841715640]]$$

$$102 = 130 \left(\frac{0.2}{200} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.03511439352]]$$

$$102 = 132 \left(\frac{0.2}{200} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.03732458648]]$$

$$102 = 132 \left(\frac{0.2}{200} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.03732458648]]$$

$$102 = 131 \left(\frac{0.2}{200} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.03622370796]]$$

20% 300 kPa

$$102 = 143 \left(\frac{0.3}{300} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.04891195523]]$$

$$102 = 146 \left(\frac{0.3}{300} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.05191756134]]$$

$$102 = 146 \left(\frac{0.3}{300} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.05191756134]]$$

$$102 = 146 \left(\frac{0.3}{300} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.05191756134]]$$

$$102 = 151 \left(\frac{0.3}{300} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.05679225851]]$$

$$102 = 149 \left(\frac{0.3}{300} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.05486203222]]$$

$$102 = 149 \left(\frac{0.3}{300} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.05486203222]]$$

$$102 = 150 \left(\frac{0.3}{300} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.05583036243]]$$

$$102 = 142 \left(\frac{0.3}{300} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.04789605754]]$$

$$102 = 147 \left(\frac{0.3}{300} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.05290572100]]$$

Figur G.2. Nonlinearitetsberegning for stabilgrus med 20% runde materialer.

40% 200 kPa

$$101 = 121 \left(\frac{0.2}{200} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.02615466551]]$$

$$101 = 123 \left(\frac{0.2}{200} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.02852791255]]$$

$$101 = 123 \left(\frac{0.2}{200} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.02852791255]]$$

$$101 = 126 \left(\frac{0.2}{200} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.03201639044]]$$

$$101 = 126 \left(\frac{0.2}{200} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.03201639044]]$$

$$101 = 128 \left(\frac{0.2}{200} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.03429619862]]$$

$$101 = 129 \left(\frac{0.2}{200} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.03542277884]]$$

$$101 = 129 \left(\frac{0.2}{200} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.03542277884]]$$

$$101 = 131 \left(\frac{0.2}{200} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.03764997396]]$$

$$101 = 128 \left(\frac{0.2}{200} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.03429619862]]$$

40% 300 kPa

$$101 = 129 \left(\frac{0.3}{300} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.03542277884]]$$

$$101 = 137 \left(\frac{0.3}{300} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.04413306446]]$$

$$101 = 142 \left(\frac{0.3}{300} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.04932232353]]$$

$$101 = 145 \left(\frac{0.3}{300} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.05234887615]]$$

$$101 = 146 \left(\frac{0.3}{300} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.05334382733]]$$

$$101 = 146 \left(\frac{0.3}{300} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.05334382733]]$$

$$101 = 147 \left(\frac{0.3}{300} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.05433198699]]$$

$$101 = 148 \left(\frac{0.3}{300} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.05531344720]]$$

$$101 = 150 \left(\frac{0.3}{300} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.05725662842]]$$

$$101 = 146 \left(\frac{0.3}{300} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.05334382733]]$$

Figur G.3. Nonlinearitetsberegning for stabilgrus med 40% runde materialer.

70% 200 kPa

$$88 = 115 \left(\frac{0.2}{200} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.03873838940]]$$

$$88 = 129 \left(\frac{0.2}{200} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.05536901272]]$$

$$88 = 133 \left(\frac{0.2}{200} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.05978965627]]$$

$$88 = 135 \left(\frac{0.2}{200} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.06195036545]]$$

$$88 = 128 \left(\frac{0.2}{200} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.05424243250]]$$

$$88 = 135 \left(\frac{0.2}{200} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.06195036545]]$$

$$88 = 136 \left(\frac{0.2}{200} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.06301874541]]$$

$$88 = 137 \left(\frac{0.2}{200} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.06407929834]]$$

$$88 = 142 \left(\frac{0.2}{200} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.06926855741]]$$

$$88 = 139 \left(\frac{0.2}{200} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.06617737603]]$$

70% 300 kPa

$$88 = 136 \left(\frac{0.3}{300} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.06301874541]]$$

$$88 = 147 \left(\frac{0.3}{300} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.07427822087]]$$

$$88 = 151 \left(\frac{0.3}{300} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.07816475838]]$$

$$88 = 155 \left(\frac{0.3}{300} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.08194967534]]$$

$$88 = 152 \left(\frac{0.3}{300} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.07912030526]]$$

$$88 = 154 \left(\frac{0.3}{300} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.08101268290]]$$

$$88 = 158 \left(\frac{0.3}{300} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.08472480493]]$$

$$88 = 155 \left(\frac{0.3}{300} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.08194967534]]$$

$$88 = 155 \left(\frac{0.3}{300} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.08194967534]]$$

$$88 = 158 \left(\frac{0.3}{300} \right)^n \xrightarrow{\text{solve for n}} [[n = 0.08472480493]]$$

Figur G.4. Nonlinearitetsberegning for stabilgrus med 70% runde materialer.