

Thesis 225

# Anläggning av väg med stabiliserade lager

En litteratur- och fallstudie om stabiliserade lagers kontrollmetoder och miljöpåverkan

---

Christian Nilsson  
Marcus Hallberg



Trafik och väg  
Institutionen för Teknik och samhälle  
Lunds Tekniska Högskola, Lunds universitet

# Anläggning av väg med stabiliserade lager

En litteratur- och fallstudie om stabiliserade lagers kontrollmetoder och miljöpåverkan

Marcus Hallberg  
Christian Nilsson

Thesis / Lunds Tekniska Högskola,  
Institutionen för Teknik och samhälle,  
Trafik och väg, 225

ISSN 1653-1922

Marcus Hallberg och Christian Nilsson

## Anläggning av väg med stabiliserade lager

2012

*Ämnesord:*

Cementstabilisering, Hurva-Rolsberga, kontrollmetoder, koldioxidanalys, energianalys.

*Referat:*

Delar av E22 genom Skåne byggs under år 2012 om med en stabiliserad överbyggnad. Denna konstruktionstyp är ovanlig i Sverige och därför finns det en del frågetecken som är av intresse att utreda. Examensarbetet behandlar lämpliga kontrollmetoder under byggfasen för det stabiliserade lagret, för att säkra dess funktions- och bärighetskrav. Konstruktionstypen analyseras även i koldioxid- och energiförbrukningssynpunkt för uppförandet, jämfört med en referenskonstruktion av konventionell art med hänsyn till tillverkning och transport av ingående material.

*English title:*

Road construction on stabilized layers

*Citeringsanvisning:*

Marcus Hallberg, Christian Nilsson, Anläggning av väg med stabiliserade lager. Lund, Lunds Tekniska Högskola, Institutionen för Teknik och samhälle. Trafik och väg 2012. Thesis. 225

---

## Förord

Examensarbetet ”Anläggning av väg med stabiliserade lager” innebär att vi nu fullgjort vår utbildning till Civilingenjörer inom Väg- och vattenbyggnad och är redo att ta steget ut i arbetslivet för att praktisera våra kunskaper.

Tacksamhet riktas till samtliga som har hjälpt till med att göra examensarbetet möjligt. Först och främst vill vi tacka vår handledare Peter Ekdahl, som förmedlade idén till examensarbetet och som har hjälpt oss att genomföra det. Vi tackar också vår examinator Anders Lenngren på LTH och opponenter Sara Thunberg och Anna Petterson, samt Per Viktorsson på Trafikverket. Vi vill också tacka Åsa Lindgren på Trafikverket samt Ulf Ekdahl på Ekdahl Geodesign, som ställt upp på intervjuer och bidragit med ovärderliga kunskaper. Arbetet har till största delen genomförts vid Ramböll RST i Malmö, och stor tacksamhet riktas till samtliga anställda på denna avdelning, som alltid gett tid för frågor och som gjort vår vistelse mycket trevlig. Ett tack riktas också till Steve Finnie på URS i Nottingham, för hjälpen med koldioxidanalyserna.

Åren i Lund har varit en viktig och oförglömlig del av våra liv och avslutningsvis vill vi tacka samtliga kurskamrater, lärare och personal som vi kommit i kontakt med under studietiden och sist men inte minst, våra egna nära och kära. Utan er hade inget av detta varit möjligt.

Lund, Valborgsmässoafton 2012

.....  
Marcus Hallberg

.....  
Christian Nilsson



---

## Innehåll

1. Inledning .....	8
1.1 Bakgrund.....	9
1.2 Väg E22 .....	10
1.3 Syfte och mål .....	11
1.4 Problemställning .....	12
1.5 Avgränsningar.....	12
2. Metod .....	13
2.1 Val av metoder .....	13
2.2 Litteraturstudie .....	14
2.3 Kontaktsamtal .....	14
2.4 Fallstudie E22 .....	14
3. Teori - Stabilisering med cement och kalk .....	15
3.1 Hur och varför stabilisera?.....	15
3.2 Mekanik bakom metoden.....	17
3.3 Hållfasthetsegenskaper.....	18
3.4 Problembild.....	19
3.5 Förutsättningar för stabilisering .....	21
3.6 Miljö- och energiaspekter .....	26
4. Säkerställande av kvalitet och bärighet.....	27
4.1 Arbetsprocessen .....	27
4.2 Sveriges Regelverk .....	28
4.3 Referenslitteratur.....	30
4.4 Kontroller för stabiliserade lager .....	32
4.5 Kontrollmetoder .....	33
4.6 Kontroller för stabiliserade lager vid tillverkning.....	40
4.7 Uppföljning med kontroller efter tillverkning.....	49
4.8 Intervju.....	52
4.9 Valda kontroller på vägbygget vid E22, riktvärden och resultat.....	53
4.10 Resultat utifrån litteraturstudie, kontakt och fallstudie .....	55
5 Energi- och miljöanalys .....	58
5.1 Koldioxidutsläpp och energiförbrukning vid vägbyggnad.....	58
5.2 Metod vid beräkningar av koldioxidutsläpp och energiförbrukning.....	59
5.3 Koldioxidutsläpp vid produktion och transport av material.....	60
5.4 Energiförbrukning vid produktion och transport av material.....	62
5.5 Ombyggnadsförslag för delsträcka Hurva-Rolsberga.....	62
5.6 Framtagning av energi- och emissionsfaktorer .....	65
5.7 Beräkningar av koldioxidutsläpp med Carbon Calculator .....	71
5.8 Beräkningar av koldioxidutsläpp med WLCO <sub>2</sub> T .....	78
5.9 Beräkningar av energiåtgång .....	79
5.10 Sammanfattning av resultat från miljö- och energianalyserna.....	83
6. Diskussion.....	84
6.1 Säkerställande av kvalitet och bärighet.....	84
6.2 Energi- och miljöanalys .....	85
7. Slutsats .....	87
7.1 Säkerställande av kvalitet och bärighet med kontroller .....	87

---

7.2 Energi- och miljöanalys .....	88
8. Referenser .....	90
Bilagor.....	95

---

## Sammanfattning

I detta examensarbete har vägkonstruktioner med stabiliserade lager undersökts, utifrån vilka kontrollmetoder som är lämpliga att utföra vid byggskedet. Konstruktionstypen har också undersökts utifrån ett miljö- och energiperspektiv genom en enklare analys, jämfört med en antagen konventionell konstruktion enligt svenska riktlinjer.

*Kontrollmetoder* har undersökts utifrån litteraturstudier, kontakt med fackmän och studier av vägbygget vid väg E22 Hurva- Rolsberga. Utifrån detta kan konstateras att frekvent angivna kontroller vid byggskedet, och som även är kritiska för vägens livslängd och funktion är inblandningsmaterialets kornfraktionsfördelning, frys och tö egenskaper samt organisk halt. Vid arbetsfasen ingår följande kontroller enligt framkommet resultat:

- Spridd bindemedelsmängd med hjälp av tråg eller duk
- Uppnått vatteninnehåll med hjälp av isotopmätare eller labförsök
- Uppnått infräsningsdjup med hjälp av mätustrustning på infräsningsmaskin
- Uppnådd packningsgrad/luftporhalt med hjälp av isotopmätare
- Härdningens omfattning och fortskridande
- Uppnådd hållfasthet och hållfasthetsutveckling med hjälp av seismik och provtryckning

*Miljö- och energianalyser* har utförts med hjälp av tillgängliga mjukvaror och egna handberäkningar. Moment som har analyserats är tillverkning och transport för ingående material, för en konventionell och en stabiliserad vägkonstruktion. Fritt tillgängliga emissionsvärden från både Sverige och England har använts. Utifrån den antagna konstruktionen av konventionell typ och vägkonstruktionen stabiliserad med 80 % cement och 20 % masugnsslagg kan konstateras att den stabiliserade varianten bidrar till både högre energiförbrukning och koldioxidutsläpp.





---

## Summary

This thesis has investigated the construction of roads with stabilized unbound layers based on the control methods that are suitable to perform in the construction phase. The construction has also been examined from an environmental and energy perspective by a simpler analysis, compared with an assumed conventional design according to Swedish guidelines.

*Control methods* have been examined by literature studies, contact with professionals and studies of a road construction at E22 Hurva-Rolsberga. From this it was found that frequent controls defined at the building stage, critical for the roads life and function are; fraction distribution, freeze and thaw properties and organic content of the material aimed to be stabilized. It was also found that important measures during the construction phase are control of:

- Binder spreading quantity using trays
- Achieved water content using isotope meter in field or laboratory methods
- Achieved mixing depth with measuring equipment directly on the mixing machine
- Achieved compaction / air void content using isotope meter
- Progress and extent of hardening
- Achieved strength and strength development using seismic testing in field and compressive testing in laboratory environment

*Environmental and energy* analysis have been performed using available software and hand calculations. Parts that have been analyzed are the manufacture and transportation of input materials for a conventional and a stabilized road construction. Freely available emission values from both Sweden and England have been used. Based on the assumed construction of the conventional type and a road structure stabilized by 80 percent cement and 20 percent blast furnace slag, it can be noted that the stabilized type contributes to higher energy consumption and carbon emissions during the manufacturing and transportation of used materials.



---

## 1. Inledning

Sveriges stamnät av vägar och järnvägar utgör en viktig del för landets utveckling, och då inte minst Europavägarna. Regeringen har beslutat att för perioden år 2012 till 2013 införa en satsning på infrastrukturprojekt i Sverige. Totalt ska 5 miljarder kronor i extrainsatta medel disponeras i den svenska väg- och järnvägssektorn, utöver de 42,5 miljarder kronor som är avsatt för området transportpolitik. (Regeringskansliet-b, 2011). För vägsektorn utgörs satsningen av 1,4 miljarder kronor under den avsedda perioden och sträckor av samhällsekonomisk vikt ska ges förtur (Regeringskansliet-a, 2011).

Att i infrastrukturprojekt åstadkomma ekonomisk hållbarhet samtidigt som miljöpåverkan minskas är vad som eftersträvas ur samhällsekonomisk synvinkel. Trafikverket skriver i sin årsrapport från år 2010 att sex punkter av strategisk vikt identifierats för organisationen. Dessa behandlar ett energieffektivt transportsystem med effektiva transportkedjor, ett robust infrastruktursystem, väl fungerande resor och transporter i storstadsregioner, Trafikverket som modern myndighet samt mer nytta för pengarna (Trafikverket- b, 2011).

Enligt miljöbalken finns skyldighet att hushålla med råvaror och energi inom alla verksamheter. Vägbyggnadssektorn är inget undantag. Målet är att hitta en lösning som är pålitlig, hållfast och hållbar i ett längre tidsperspektiv och som kan användas i större skala. Andra kapitlet i miljöbalken, paragraf två säger att:

*”Alla som bedriver en verksamhet eller vidtar en åtgärd skall hushålla med råvaror och energi samt utnyttja möjligheterna till återanvändning och återvinning. I första hand skall förnybara energikällor användas”. (MB kap. 2§2 ).*

För att tillämpa dessa krav och riktlinjer inom vägbyggnadssektorn samt främja de mål som nämns i Trafikverkets årsrapport, krävs att blicken lyfts utanför de konventionella metoder som används i nuläget. En metod som funnits i decennier, men som inte fått någon större respons är stabiliseringstekniken. Stabiliseringstekniken har vid många tillfällen förklarats som en metod som besparar värdefulla naturresurser, samtidigt som bärighet och livslängd ökar för vägkonstruktionen. Trots detta har metoden inte fått någon större genomslagskraft i Sverige. I samband med breddningen av E22:an i Skåne har nu tekniken åter lyfts fram och två delsträckor om vardera 5,5 samt 10 kilometer anläggs med cementstabilisering.

Stabilisering ger möjlighet att förbättra annars undermåliga eller normalpresterande jordarter till hög standard, in situ (Little, Males, Prusinski, & Barry, 2000). Vanligast inom vägbyggnadssektorn är att stabilisera med cement eller kalk. Fördelen med stabilisering är att det finns möjlighet att använda befintliga material i vägens närområde och på så vis spara högvärdiga material och långa transporter av dessa. Samtidigt förbättras också bärigheten i förhållande till en konventionell konstruktion.

---

Detta möter dagens krav från ökade trafiklaster samt att sannolikheten för skador på vägen minskar. Dessutom kan produktionen av vägen bli effektivare.

I denna rapport analyseras cement- och kalkstabiliseringens möjligheter inom vägbyggnad i Sverige.

*Cementstabilisering* introducerades i Sverige under 1950-talet som ett svar på ett intensivt byggande av flygfält och vägar (Höbeda, 1985). Det första vägbygget i Sverige som utfördes i full skala med metoden anlades år 1967, en förbifart vid Vårgårda med en sträckning på sex kilometer. Då användes cementstabiliserat grus i förstärkningslagret.

*Kalkstabilisering* av vägars underbyggnad har skett i mindre skala i Sverige och dokumentation om dessa finns i fallstudier från 1960- och 1970-talet. Det finns dock få erfarenheter på överbyggnader som har stabiliserats med kalk.

Gemensamt för stabiliseringsmetoderna med cement och kalk, är att de har använts med bättre erfarenheter och i större utsträckning i andra länder såsom Danmark, Norge, Finland, USA, Schweiz, Tyskland, Australien m.fl. Naturgrus och krossmaterial har länge varit lätt att tillgå i Sverige för en låg kostnad, vilket har lett till att metoder såsom kalk- och cementstabilisering inte har varit av intresse.

Det finns potentiella nackdelar med stabiliseringstekniken, bl.a. är det vanligt att hydratationssprickor uppstår när cementet härdar. Dessa ger upphov till vertikala sprickor längs med vägsträckningen. Sprickorna kan dock minskas om kontroller utförs på rätt sätt under byggfasen.

## **1.1 Bakgrund**

Under slutet av 1990-talet undersökte Trafikverket möjligheten att bredda E22 genom Skåne, både av trafiktekniska och konstruktionstekniska skäl. Nu har projektet påbörjats och medför att delsträckor som tidigare hade en körbana i vardera riktningen breddas till motorväg med två filer i vardera riktningen.

Vid undersökningar utförda av Ramböll RST år 2010/2011 visade det sig att egenskaper och förutsättningar varierade i stor omfattning längs med sträckningen. Resultat medförde att projektet nu innebär ett större ingrepp än vad som tidigare var planerat. För att lösa bärighetsproblemen tas en större del av väggroppen bort och ersätts med en stabiliserad vägkonstruktion. Stabiliseringen gör att vägen får en mer homogen profil och en förväntad längre livslängd med lägre drift- och underhållskostnader.

Arbetet på dessa sträckor utförs nu som en totalentreprenad med funktionsansvar med STRABAG som huvudentreprenör. Funktionsentreprenaden har på grund av rådande omständigheter medfört att STRABAG valt en cementstabiliserad överbyggnad. Projektet är unikt då det är det första större vägprojektet i Sverige med

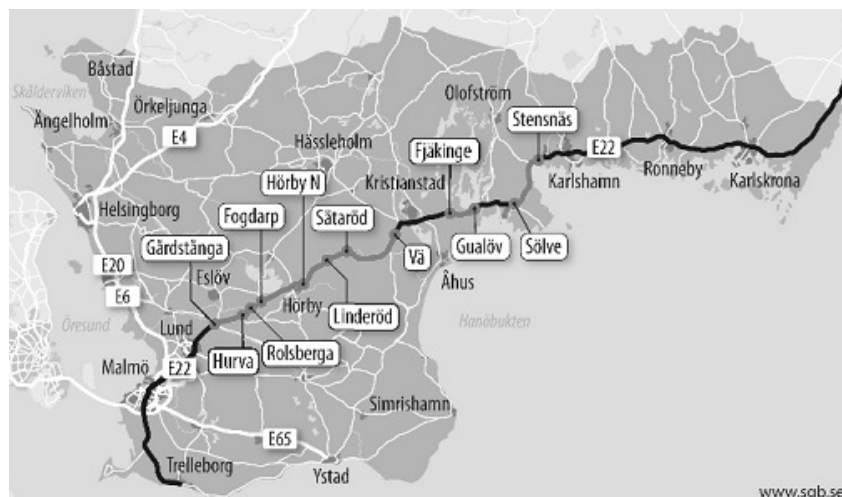
cementstabilisering som förstärkningsmetod. Tidigare har stabilisering som byggnadssätt, varit mindre konkurrenskraftigt i Sverige på grund av god tillgång på grus och krossmaterial. Arbetet på väg E22 har dock medfört att intresset för konstruktionstypen och dess möjligheter återigen växt.

Med hänsyn till cement- och kalkstabiliseringens ringa omfattning i Sverige är det delar när det gäller arbetsprocess och utredningar som saknas i svensk författning. Det finns frågetecken angående de kontrollmetoder som behövs för att säkerställa att konstruktionen får de egenskaper som förutsatts. Detaljer kring vissa kontrollmetoder som är lämpliga för konstruktionen saknas i de tekniska krav och råd som finns att tillgå i Sverige. Kunskapen om kontrollmetoder finns i nuläget hos enskilda fackmän och är inte tillgängligt i allmän praxis. Det är en viktig del av kvalitetssäkringen av ett projekt att kontrollmetoder som ska utföras är väl dokumenterade och definierade. Trafikverket har intresse att utreda detta närmare, för att få en bättre uppfattning om vilka kontrollmetoder som är lämpliga samt hur de utförs.

Att jämföra en cementstabiliserad vägkonstruktion i förhållande till en konventionell referenssträcka med avseende på koldioxidutsläpp och energiåtgång kan ge en bild av hur en stabiliserad vägkonstruktion står sig mot det vägbyggnadssätt som länge använts i Sverige ur miljösynpunkt. Detta är något som Trafikverket vill utreda.

## 1.2 Väg E22

Regeringen har gett klartecken till att delar av E22 ska byggas om till mötesfri landsväg. I dagsläget är vägen hårt trafikerad och olycksdrabbad. Med utbyggnaden förbättras kapaciteten, vägsträckningen blir säkrare och miljön för boende i området förbättras (Trafikverket-f, 2012). Med utbyggnaden kommer också möjligheterna för näringslivet och rörligheten på arbetsmarknaden att förbättras i Öresundsregionen. Väg E22:s totala sträckning går från Trelleborg till Norrköping.

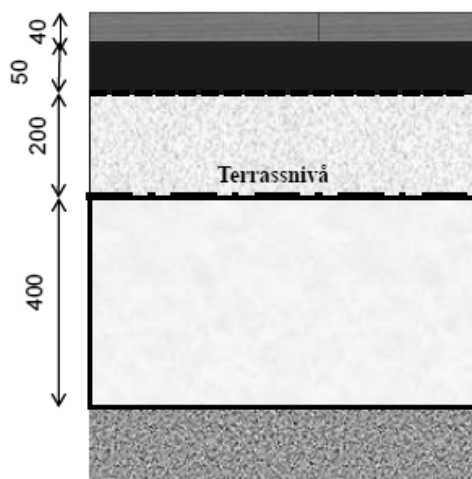


Figur 1- Karta över delsträckor vid ombyggnad av E22. Källa:SGB

Två av delsträckorna byggs under år 2011 till 2012 om av entreprenören STRABAG. På dessa delsträckor har STRABAG valt att använda en teknik för att öka bärigheten. Istället för en traditionell uppbyggnad av överbyggnaden kommer vägen stabiliseras med cement. Det är första gången som denna metod används i större skala i Sverige (Trafikverket-f, 2012). I denna rapport analyseras delsträcka Hurva – Rolsberga.

### 1.2.1 Delsträcka Hurva - Rolsberga

16 600 fordon per dygn passerar normalt sträckningen mellan Hurva-Rolsberga som är 5,5 km lång. Vägen breddas till motorväg längs med den nuvarande sträckningen. Huvudentreprenör är STRABAG och byggstart var den 3 september år 2010. Arbetet beräknas vara klart i december år 2012 och kostnaden för sträckningen är 260 miljoner kronor (Trafikverket-f, 2012). Ombyggnaden innebär att konstruktionen stabiliseras med cement, och vägkroppens uppbyggnad sker enligt figur nedan.



Figur 2- Vägens uppbyggnad; 40 mm asfalt, 50 mm bindlager, 200 mm stabiliserat bärlager, 400 mm stabiliserad terrass. Källa: Ekdahl (2010)

### 1.3 Syfte och mål

Syftet med examensarbetet är att redogöra för de kontrollmetoder som finns att tillgå vid kalk- och cementstabilisering, samt hur de appliceras i vägbyggnadssektorn. Syftet är också att jämföra en cementstabiliserad vägkonstruktion med en konventionell sådan i ett miljö- och energiperspektiv.

*Kontrollmetoder* kommer att undersökas utifrån de krav och råd som Trafikverket ger i sina tekniska skrifter och de skrifter som Trafikverket hänvisar till. Utöver detta kommer annan fackmässig litteratur från Sverige, Norden och övriga världen att användas (såsom USA, Canada, Australien m.fl.). Erfarenheter från vägbygget på E22 kommer också användas som underlag genom intervjuer med utvalda personer. Kontrollmetoderna kommer att beskrivas allmänt, men analyseras framför allt i förhållande till byggfasen av ett vägprojekt. Djupare beskrivningar kommer endast ske av de kontroller som anses kritiska för konstruktionen, och som saknar stöd i regelverk. Kontrollerna som utförs vid tillverkning av en stabiliserad konstruktion är

---

konkreta. Regelverk från Sverige har standardiserat många kontroller vid anläggande av vägar. Dock finns det en del kontroller nämnda i äldre dokument från Sverige och även från organisationer i andra länder, som inte beskrivs närmare i svensk författning som det ser ut idag.

En övergripande *energi- och miljöanalys* kommer att utföras på delsträcka Hurva-Rolsberga. Denna delsträcka var i ett tidigare skede tänkt att byggas med en konventionell konstruktion (slitlager, bindlager, bundet bärlager, obundet bärlager och förstärkningslager). Denna tidigare konstruktion ska jämföras med den nu aktuella, stabiliserade konstruktionen. Arbetet omfattar alltså inte en livscykelanalys. Istället ges en övergripande kvalitativ miljö- och energianalys där koldioxidutsläpp och energiåtgång under byggfasen studeras.

Målet med rapporten är att tillhandage kunskap i hur bärigheten kan säkerställas vid kalk- och cementstabilisering med hjälp av kontrollmetoder. Målet är också att på ett kvalitativt plan jämföra energi- och miljöaspekter för en stabiliserad och en konventionell konstruktion.

#### **1.4 Problemställning**

Följande problemställningar ska besvaras.

- Hur kan den stabiliserade konstruktionen kontrolleras under och efter byggfasen så att funktions- och bärighetskrav säkerställs?
- Vilka av dessa kontroller behöver klarläggas utifrån vad som behandlas i svenskt regelverk?
- Vilka av de befintliga kontrollmetoderna används och vilka av dem är att föredra ur ett erfarenhetsperspektiv?
- Hur förhåller sig en cementstabiliserad konstruktion ur miljö- och energiförbrukningssynpunkt?

#### **1.5 Avgränsningar**

I kontrollmetodskapitlet behandlas inte verkblandade massor vid utläggning av det stabiliserade lagret. Kontrollmetoderna som beskrivs behandlar endast byggfasen och tiden för härdning. Endast de kontrollmetoder som skiljer sig från konventionella vägkonstruktioner behandlas, alltså tas inga geometriska kontroller upp förutom lagertjocklekskontroller.

Vid miljö- och energianalysen analyseras endast energiåtgång och koldioxidutsläpp under byggfasen. Analysen omfattar inte själva utförandet av konstruktionen, utan endast de transporter som sker och tillverkning av ingående material. Tidigare studier, exempelvis utförd av Lindén (2008), har visat att själva utläggningen och emissioner från arbetsmaskiner är förhållandevis små och likartade poster jämfört med transport och tillverkning, tas inte hänsyn till denna fas vid beräkningarna. Inte heller energiförbrukningen från själva arbetsplatsen är något som visat sig ge större skillnader i exempelvis Lindén (2008), därmed beräknas inte heller denna.



---

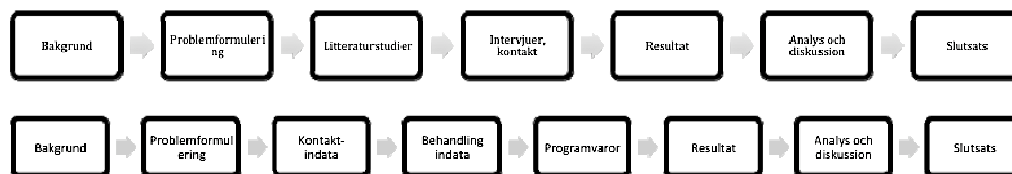
## 2. Metod

### 2.1 Val av metoder

För att utreda frågorna i problemställningen utgås i första hand från en litteraturstudie. Litteraturstudien kompletteras vid behov med intervjuer av fackmän inom varje delområde. Rapporten delas in i områdena:

- Kontrollmetoder
- Energi- och miljöanalys

En teoretisk bakgrund erbjuds till varje avsnitt för att ge läsaren den information som krävs för att kunna förstå de bakomliggande förutsättningarna i rapporten. Processchema för arbetet ses nedan.



Figur 3 - Processchema för analys av kontrollmetoder (ovan) och miljö- och energianalys (under)

För att sammanställa hur *kontrollmetoder* kan användas under- och efter byggfasen, undersöks existerande råd, tekniska krav och litteratur som publicerats av Trafikverket och andra organisationer inom området, samt hur likvärdiga handlingar utformats i övriga Norden. Även litteratur från utvalda länder från övriga världen kommer att undersökas. Intervjuer görs med fackmän, för att validera dessa. Resultatet kommer slutligen mynna ut i en presentation av kontrollmetoder under byggfasen som kan tillämpas i mer allmän praxis för att säkerställa funktions- och bärighetskrav.

Energi- och miljöavsnittet utförs som en fallstudie på en delsträcka av E22 som breddas till fyra filer mellan Hurva- Rolsberga under år 2011 till 2012. Vid fallstudien används erfarenheter och litteratur från de inblandade aktörerna; beställaren *Trafikverket*, entreprenören *STRABAG*, cementleverantören *Cementa* och konsultfirman *Ekdahl Geodesign AB*. Även expertis från handledare och andra medarbetare på *Rambölls* avdelning RST nyttiggörs. Vid beräkning av koldioxidutsläpp används det brittiska vägverkets programverktyg ”*Carbon Calculator*” och URS program ”*WLCO2T*”.

---

## 2.2 Litteraturstudie

I examensarbetets inledande skede utförs en litteraturstudie för att sammanställa erfarenheter relevanta för frågeställningen, utifrån kunskap från Norden, och delar av resterande länder. I studien har litteratur inhämtats från internet, biblioteksdata-baser och andra relevanta databaser. Huvudkällorna för litteratursökningen följer nedan:

- Lunds Universitetsbibliotek, databaser Lovisa och Elin.
- Transportportalen Transguide.org
- Trafikverkets publikationsbibliotek
- VTI:s publikationsbibliotek
- Trafikverkets publikationsbibliotek

## 2.3 Kontaktsamtal

Kontakt med involverade inom området sker för att komplettera litteraturstudien, samt för att tillföra nya kunskaper till rapporten. Följande kontakter har gjorts:

- Ulf Ekdahl, Ekdahl Geodesign, datum: 2012-03-05.

## 2.4 Fallstudie E22

En fallstudie utförs för vägbygget E22 Hurva- Rolsberga där utvalda kontrollmetoder analyseras för att komplettera litteraturstudien och kontaktsamtalen. Fallstudien utgör en grund för att tillföra modern kunskap och komplettera de erfarenheter som erhålls från litteraturstudien.

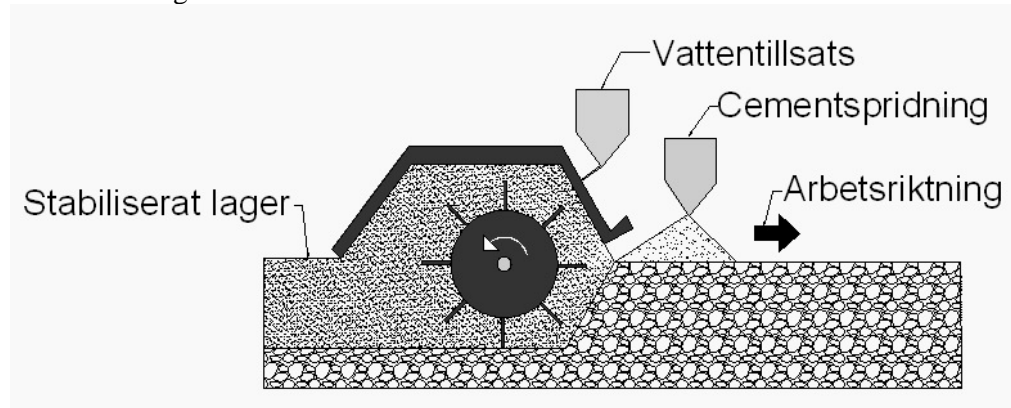
### 3. Teori - Stabilisering med cement och kalk

Detta avsnitt beskriver hur och varför stabilisering utförs vid vägbyggnad samt tar upp miljöaspekter med avseende på detta byggnadssätt.

#### 3.1 Hur och varför stabilisera?

Grundprincipen för stabilisering av obundna lager inom vägbyggnadstekniken är att med hjälp av bindemedel förbättra egenskaperna för de fraktioner som används i vägkonstruktionen. Två bindemedelsalternativ vid stabilisering av obundna lager i en vägkonstruktion är cement eller kalk. Grundidén är att förbättra jordens egenskaper så att lagret avlastar spänningsbildningen i vägkonstruktionen, liksom en platta (Vägverket, 1992). Metoden medför en väg med bättre bärighetsegenskaper gentemot en traditionell lösning.

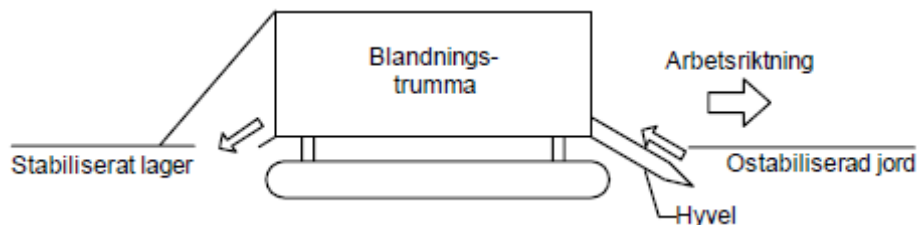
Stabilisering av en vägkonstruktion kan ske i *terrassytan*, *förstärkningslagret* eller *bärlagret*. Antingen utförs stabiliseringen som en markblandningsmetod, då befintligt jordmaterial på plats blandas med bindemedel. Eller så utförs stabiliseringen med verkblandningsmetoden, där samtliga komponenter (vatten, cement/kalk och ballast) blandas i ett verk. Då används naturgrus eller krossten som ballast. Markblandningsmetoden har med tiden blivit mer effektiv vilket har medfört att verkblandningsmetoden sällan används numera. Figuren nedan visar principen för markblandningsmetoden.



Figur 4 - Principfigur för hur markblandad stabilisering utförs.

Cement och det befintliga materialet mixas med hjälp av en fräs. På detta sätt fås en jämn blandning av materialet samtidigt som mixningsdjupet blir konstant. Vanligtvis utförs detta på terrass, bär- eller förstärkningslager. Little (2004) nämner dock att fräsning kan utföras direkt på asfaltslagret på en befintlig väg. Denna metod beskrivs som enkel och snabb samtidigt som ett bra resultat uppnås. Beroende på asfaltslagrets tjocklek kan det dock krävas ett flertal passager för att uppnå önskat djup.

Ett alternativt utförande av markblandningsmetoden illustreras i figuren nedan. Istället för att materialet mixas med en fräs, hyvlas det upp och blandas med cement och vatten i en separat blandningstrumma på maskinen för att sedan läggas ut igen.



Figur 5 – Ett alternativ vid markstabilisering. Istället för mixning, hyvlas befintligt material upp och blandas inuti maskinen.

### 3.1.1 Indelning av olika typer av stabilisering

När stabilisering av vägar omnämns i litteratur är det ofta svårt att avgöra vilken stabiliseringsteknik som åsyftas, hur mycket cement som används, vilket lager som stabiliseras och så vidare. Hicks (2002) har gjort en indelning av olika tekniker av stabilisering i vägbyggnadssammanhang med hänsyn till egenskaper och påvisar skillnaden mellan obundna, modifierade och stabiliserade lager i Alaska:

<b>Obundna lager</b>	<i>Byggs upp av naturgrus eller krossmaterial. Kan inte ta någon signifikant draglast. Upptar laster utifrån kohesion och friktion mellan ingående partiklar.</i>
<b>Modifierade material</b>	<i>En mindre mängd stabilisator (kalk/cement) tillförs för att förbättra jordmaterialets egenskaper samt/eller öka dess fukt och frost beständighet. Hållfasthet kommer främst från kohesion och inre friktion mellan partiklarna.</i>
<b>Bundna material</b>	<i>Bindemedel tillförs i större mängder vilket ger högre hållfastheter. Denna stabilisering bidrar jämfört med de övriga två metoderna till en större konstruktiv bärighetsförmåga. Hållfastheten kommer främst från bindning mellan partiklar, kemisk bindning och kohesion.</i>

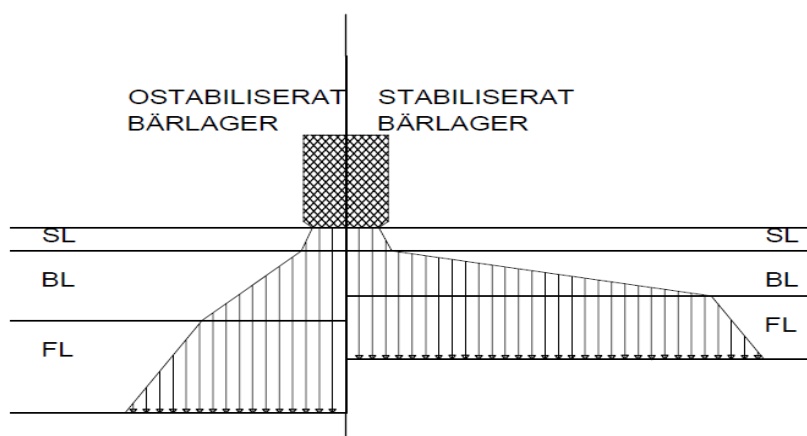
I ovanstående indelning ligger stabiliseringen som utförs på E22 någonstans mellan modifierade och bundna material, både vad det gäller cementmängd och sluthållfasthetsvärde. Tabellen 1, ger en beskrivning av vilka hållfasthetsvärden som ges för modifierade samt bundna material enligt Hicks (2002). GP står för "General Purpose cement" och GB står för "General Blend cement" enligt australiensk standard AS3972.

Tabell 1- Hållfastheter hos modifierade och bundna material (Austroads, 2002) .

Typ av stabilisering	Cementstabilisering viktprocent		Minsta tryckhållfasthet (UCS) efter 7 dygn (MPa)		
	Min	Max	GP cement	GB cement	Slagg/Kalk blandningar
Modifierade material	2,0	3,0	2	1,5	1
Bundna material	4,5	5,5	-	3,5	2,5

### 3.2 Mekanik bakom metoden

Överbyggnaden ska kunna motstå de laster som vägen utsätts för. Spänningsbilden i vägens överbyggnad från en påförd last av ett bildäck ser principiellt ut som i figuren nedan.



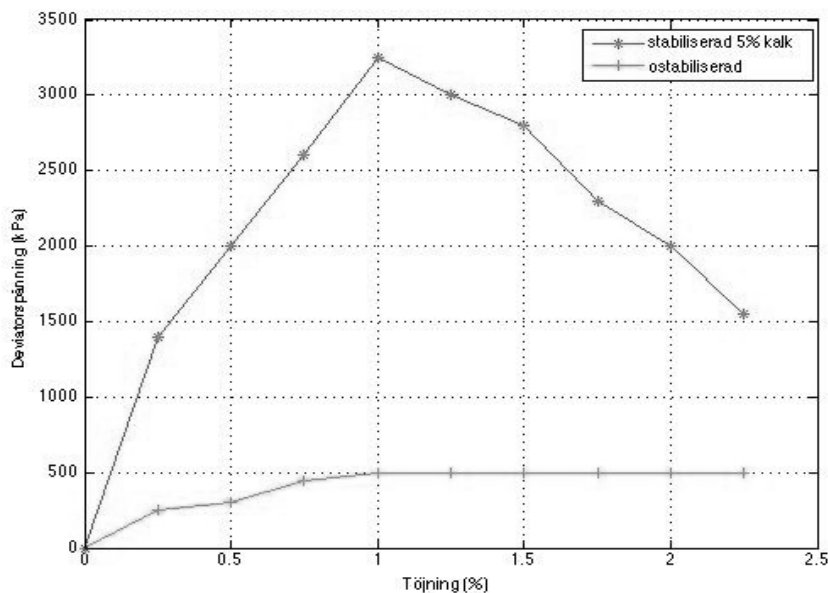
Figur 6 – Principiell bild över spänningsförhållandena i en stabiliserad och en ostabiliserad vägkropp.

Till höger i figuren visas spänningsbilden för en vägkropp med stabiliserat bärlager, jämfört med figuren till vänster som visar spänningsbilden i en ostabiliserad vägkropp. De vertikalspänningar som uppkommer på grund av lasten från bildäcket, minskar med djupet ner i överbyggnaden. Hur mycket lasten minskar beror på styvheten hos de olika lagren. Ett lager med hög styvhet ackumulerar mer av spänningen än ett lager med mindre och därmed avlastas underliggande lager på ett bättre sätt. Om vertikalspänningarna minskar, minskar även horisontalspänningarna med samma magnitud. Detta är grundtanken med cementstabilisering, där cementlagrets högre styvhet minskar spänningarna för underliggande lager i konstruktionen.

### 3.3 Hållfasthetsegenskaper

Hållfasthetstillväxten för en kalkstabiliserad massa sker med så kallade *puzzolanreaktioner*, där kalciumhydroxid (släckt kalk) och lerpartiklar bildar ett hållfast bindemedel (Axelsson & Johansson, 2002). Kalciumhydroxid skapas genom att blanda bränd kalk med vatten. Bränd kalk utvinns genom upphettning av ren kalk till över 750 °C. När bränd kalk och vatten blandas bildas kalciumhydroxid ( $\text{CaOH}_2$ ) som sedan härdar genom en *karbonatiseringsprocess*, som sker i långsam takt (Fagerlund, 1999). Kalciumhydroxid reagerar sedan med lerpartiklar, vilket ger de puzzolanreaktioner som ger den slutliga hållfastheten.

Precis som för kalk bildas vid blandning av vatten och cement kalciumhydroxid. Huvudkomponenten hos reaktionsprodukten är dock ett annat ämne, kallat *kalciumsilikathydrat*. Detta ämne fungerar som gel och ger en stabiliserande effekt. Kalciumsilikathydratet verkar i större grad till hållfasthetstillväxten än andra komponenter, vilket gör att cement får ett snabbare härdningsförlopp och en större sluthållfasthet än kalk (Axelsson & Johansson, 2002). Vid stabilisering blandas 3-12 viktprocent cement in i lagret. Beroende på funktion (bärlager eller förstärkningslager) och lagrets tjocklek fås en elasticitetsmodul runt 1500-4000 MPa och en enaxiell tryckhållfasthet mellan 2-10 MPa (Vägverket, 1995). Kalkstabiliserade lager får i princip lägre hållfastheter, mellan 1-4 MPa (Hicks, 2002). Little (1999) illustrerar i figuren nedan hållfasthetsegenskaperna för en lera stabiliserad med 6 % kalk jämfört med samma lera utan stabilisering.



Figur 7 - Skillnader i hållfasthetsegenskaper mellan ostabiliserad och stabiliserad lera. Fritt omarbetad. (Källa: Little, 1999)

Även deformationsmotståndet under upprepad belastning ökar nämnvärt för den stabiliserade lera (Little, 1999).

Från Hicks (2002) indelning av stabiliseringar (se avsnitt 3.1.1) anges att inga prestandakrav ställs då stabilisering sker genom modifiering. Endast de krav som ställs på material kontrolleras och konstruktionen anses rätt dimensionerad om dessa uppfylls. För stabiliserade lager med större mängd bindemedel sätts olika prestandakrav såsom utmattningskrav och motståndskraft mot erosion. Livslängden för en stabiliserad konstruktion kan enligt Hicks (2002) beräknas ur följande ekvation:

$$N = \left(\frac{K}{\sigma}\right)^a \quad (\text{Ekv. 1})$$

$N =$	Antalet återkommande laster till brott
$\sigma =$	Dragspänning i det cementerade materialet
$a =$	Konstant, vanligtvis 12 (Hicks 2002)
$K =$	Konstant, beroende på bindemedelsinnehåll

En liten ändring i draghållfasthet innebär en avsevärd ändring av utmattningsegenskaper för det stabiliserade lagret. Därmed är lagret känsligt för ändringar i tjocklek och hur väl materialet har blandats under byggfasen.

### 3.4 Problembild

*När stabilisering av en vägkonstruktion utförs, medför detta att en ny problembild uppkommer. Jämfört med en konventionell väggropp finns det en del aspekter där extra hänsyn måste tas.*

De tekniska problem som konstaterades vid cementstabilisering på 1960- och 1970-talen i Sverige sammanfattades som sprickbildning, byggfasens olämplighet vintertid och otillräckliga reparationstekniker (Persson, 1979). Dokumentation kring problembilden för kalkstabilisering är inte lika omfattande som för cement, dock är mekanismerna likartade och därmed de fenomen som uppkommer. I litteraturen nämns också sprickbildningen som en konsekvens av det stabiliserade lagrets känslighet mot dragspänningar. Det är viktigt att ta hänsyn till dessa problem om beständigheten i det stabiliserade lagret ska säkerställas. Nedan följer en teoretisk beskrivning av dessa problem.

#### 3.4.1 Sprickbildning

Sprickor vid härdningsförloppet i en stabiliserad konstruktion uppkommer då konstruktionen krymper under fastlåsta förhållanden. För förståelse kan mekanismerna relateras till betongläran. I en betongkonstruktion beror krympningen framför allt på cementpastans sammandragning när vattnet lämnar porsystemet. Krympningen vid en godtycklig tidpunkt beskrivs som (Byfors, 1980):

$$\epsilon_{cs}(t) = \epsilon_{csu} * f(t) \quad (\text{Ekv. 2})$$

$\epsilon_{csu} =$	Krympningens slutvärde vid fuktjämvikt med omgivningen.
--------------------	---

---

$f(t) =$  Tidsfunktion som efter lång tid närmar sig värdet 1. Utgår från noll och beskriver krympningens tidsförlopp.

$\epsilon_{cs}(t) =$  Krympningens värde vid godtycklig tid  $t$ .

Med hänsyn till hållfasthetsutvecklingen i det stabiliserade lagret, kan aktuella dragspänningar uppkomma på grund av krympning vid varje godtycklig tidpunkt beräknas. Sprickor uppkommer då det stabiliserade lagrets draghållfasthet under härdning underskrider den aktuella dragspänningen på grund av krympning. Sprickor kan dock också uppkomma under härdning vid ojämn temperaturfördelning i massan, vilket ger upphov till dragspänningar.

I en vägkonstruktion kan dragspänningar på grund av hydratationen i det stabiliserade lagret spridas till ovanliggande lager, vilket kan orsaka reflektionssprickor. Höbeda (1985) beskriver hur sprickor i ytbeläggningen uppkommer som följd av reflekterade sprickor från det stabiliserade lagret. Denna sprickbildning beskrivs i litteratur som det vanligast förekommande problemet vid cement- och kalkstabilisering. Vägverket (1995) beskriver sprickbildningen som ett fenomen som alltid uppkommer i det stabiliserade lagret, med typiska sprickavstånd på 10-50 m.

I en undersökning gjord åt Nordiska Vägtekniska Förbundet (NVF) år 1979 präglades cementstabiliseringar gjorda i Finland mellan år 1960 till 1978 av en tvärspricka var 54:e meter. Två tredjedelar av dessa stabiliseringar var gjorda med markblandningsmetoden (Nordiska Vägtekniska Förbundet, 1980).

Som motåtgärd mot tvärsprickor bör hänsyn tas för de lager som utförs ovanpå det stabiliserade lagret, med hänsyn till deformationsegenskaper och hållfasthet. Styvheten i det stabiliserade lagret ska inte vara så hög att den påverkar funktionen på övriga lager. En lösning är att lägga ett mellanlager av obundet krossat material ovanför det stabiliserade lagret. (Vägverket, 1995).

### 3.4.2 Temperaturaspekter

Både kalk- och cementstabilisering förutsätter viss temperatur vid utläggning, detta för att härdning ska kunna ske utan sprickbildning. Finska anvisningar ger ett gränsvärde för temperaturen i cementbunden massa och underlag på 5 °C (Vägverket, 1995). Likaså nämner Little (2004) att kalkstabilisering inte bör ske då lufttemperaturen understiger 40°F i skuggan (eller ca. 4,5 °C). En lägre temperatur medför att härdningsförloppet retarderar för mycket och sluthållfastheten blir för låg.

### 3.4.3 Tjäle

Alla betongkonstruktioner har större tryckhållfasthet än draghållfasthet. Samtidigt som tjälfarliga lager förbättras med cementstabilisering, är det cementstabiliserade lagret också känsligt för tjälpåverkan. Att bygga en cementstabiliserad konstruktion på underlag med stora differenssättningar är något som bör undvikas, på grund av dess känslighet för dragspänningar (Vägverket 1995). Norska Statens Vegvesen

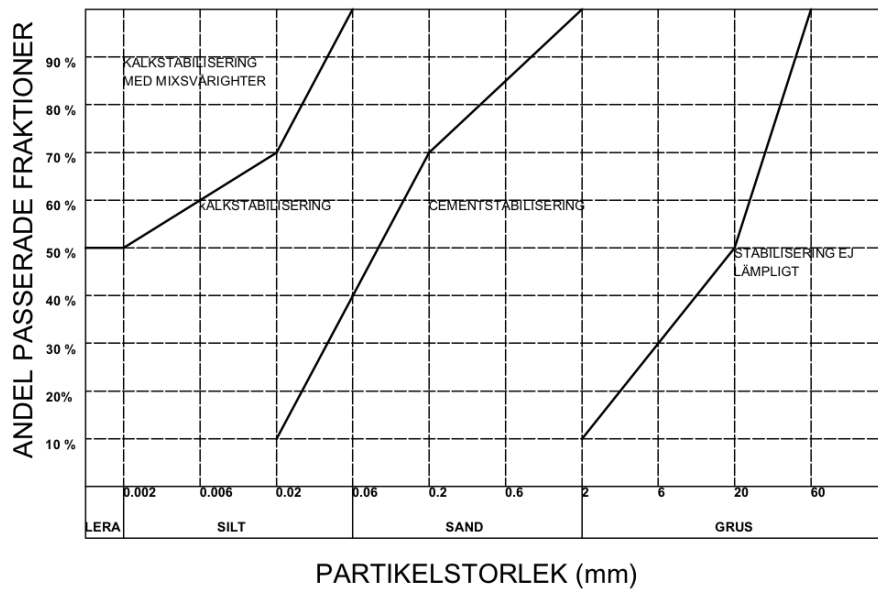


(2011) understryker att eventuell risk för tjällyftning bör undersökas innan en stabiliserad vägkonstruktion anläggs.

### 3.5 Förutsättningar för stabilisering

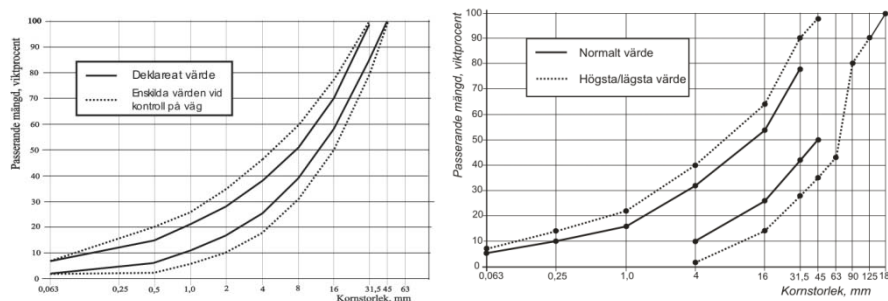
#### 3.5.1 Fraktioner

Fraktioners fördelning har stor påverkan på vilken stabiliseringsmetod som är möjlig. Assarsson (1980) har sammanställt valda bindemedel med hänsyn till aktuell fraktionsfördelning.



Figur 8 – Fraktionssammansättningar som lämpar sig för stabilisering, fritt omarbetad. Källa: Assarsson (1980)

Figuren kan jämföras med krav som finns för levererade obundna förstärknings- och bärlager i Svenskt regelverk (Trafikverket- a, 2011). En jämförelse mellan figur 8 och figur 9 visar att det endast är cement som passar som bindemedel vid förstärkning av bärlager och förstärkningslager.




Figur 9, fraktioner för bärlager (tv) och förstärkningslager (th) på belagda vägar. Källa: (Trafikverket-d, 2011)

I stort sett är det bara ensgraderade grövre kornstrukturer och tunga leror som inte är lämpliga att stabilisera med något bindemedel, samt jordar med ett plasticitetsindex över 30<sup>1</sup>. Högst hållfasthet vid stabilisering ges vid användning av blandkorniga humusfria jordarter (Hicks, 2002). Ett exempel på lämpliga jordarter är moräner med ett lågt lerinnehåll. Vid högt lerinnehåll krävs så pass mycket cement att konstruktionen ej blir lönsam, utan då är istället stabilisering med kalk ett bättre alternativ.

AustStab (1999) ger istället exempel på jordmaterial som passar för vilken typ av bindemedel. Notera speciellt kalk och cement i tabellen nedan. GP Cement står för "General purpose" cement, enligt australiensisk standard AS3972. GB står för "General blend" cement enligt australiensisk standard AS3972. Observera att klimatet skiljer sig markant, varvid de leriga jordarterna kan vara olämpliga att stabilisera i Norden, på grund av den problembild som har beskrivits i avsnitt 3.4.

**Tabell 2 - Fraktioner och dess lämplighet för stabilisering med olika bindemedel, fritt omarbetad. Källa: AustStab (1999)**

Förklaring: 

Typ av bindemedel	Krossmaterial	Välgraderad morän	Siltig/lerig morän	sand	Sandiga/siltiga leror	Tunga leror
GP Cement	■	■	■	■	■	■
GB Cement	■	■	■	■	■	■
Cementblandningar	■	■	■	■	■	■
Kalk	■	■	■	■	■	■
Kalk och cement	■	■	■	■	■	■

<sup>1</sup> Vid denna typ av jord kan en kalktillsats sänka plasticitetsindex, vilket möjliggör för cement/kalkbaserad stabilisering.

### 3.5.2 Plasticitetsindex (PI)

Den lägsta vattenkvot varvid ett jordmaterial kan rullas till en 3 mm tjock tråd kallas för plasticitetsgränsen ( $w_p$ ). Övergången där materialet övergår från plastisk till flytande konsistens kallas för flytgränsen ( $w_L$ ). Differensen mellan dessa kallas för plasticitetsindex ( $I_p$ ).

(Ekv. 3)

Plasticitetsindex används inom stabilisering som ett mått att avgöra lämplighet för ett visst bindemedel. Ett högt plasticitetsindex indikerar på större lerinnehåll. Stabilisering med cement i lerrika jordar är olämpligt. Istället är kalk lämpligare för dessa jordar. Tillsammans med kornfördelningen kan avgöras vilken av cement eller kalk som är lämpligast för stabilisering. Lämpligheten illustreras i tabellen nedan. Efter Hicks (2002).

Tabell 3 - Lämplighet för stabilisering beroende på fraktioner och plasticitetsindex, fritt omarbetad. Källa: (Hicks, 2002)

Kornstorlek	>25% passerar 75 $\mu$ m			<25% passerar 75 $\mu$ m		
	PI < 10	10 < PI < 20	PI > 20	PI < 6	PI < 10	PI > 10
Cement	Lämpligt	Tveksamt	Inte lämpligt	Tveksamt	Tveksamt	Tveksamt
Kalk	Lämpligt	Tveksamt	Tveksamt	Inte lämpligt	Lämpligt	Tveksamt

### 3.5.3 Organiskt material i blandningsfraktioner

Humushalter påverkar härdningsprocessen negativt och ett för högt innehåll medför att hållfasthetskrav blir svåra att uppnå. Ju högre humushalt desto mer cement behöver tillföras, jämfört med den tänkta inblandningen. Vid humusklass II enligt finska normer och då en hållfasthet över 6 MPa önskas, ska ett tillskott av 1-2 % cement utföras, som ett exempel. Höbeda (1985) beskriver att humushaltens inverkan på härdningsförloppet kan elimineras med hjälp av tillsats av kalciumklorid, vars halt anpassas för humusinnehållet med natronlutmetoden. Den färgskiftning som sker vid inblandning indikerar hur stort innehållet av humus är. Det kan också vara svårt att åstadkomma stabilisering med kalk om organiska innehållet i jorden är över en till två vikt-procent för inblandningsjorden. Likaså kräver jordar med sulfathalter över 0,3 % speciella åtgärder (National Lime Association, 2006).

### 3.5.4 Bindemedel

#### 3.5.4.1 Cement

Vilken cementkvalitet samt vilka mängder cement som används är viktiga aspekter att ta hänsyn till vid både förstudie och produktion. Det finns en hel del beskrivningar på hur cementets förhållande i konstruktionen ska anpassas. Generellt gäller att cementhalten bör ökas ju mindre fraktioner blandningsmaterialet innehåller. Finska vägverket definierar cementhaltens viktprocent i förhållande till stenmaterialets torrdensitet. Erforderlig cementhalt ligger mellan 3-12% för de flesta jordarter (Vägverket, 1995). Cementhalten står i proportion mot konstruktionens sluthållfasthet. Cementhalten som erfordras beror på materialets torrdensitet, ballastens fraktionsfördelning och andel humusinhåll i inblandningsmaterialet. Beräkning av cementhalten kräver kunskap om fraktionsfördelningen hos inblandningsmaterialet.

Att ta fram erforderlig cementhalt ges genom en avvägning mellan jordmaterialets torra skrymdensitet och önskad hållfasthet. Med högre skrymdensitet krävs mer cement för önskad hållfasthet. Det initiala behovet av cementhalt kan beräknas teoretiskt utifrån jordmaterialets maximala torra skrymdensitet. Finska vägverkets skrift från 1995 har en metod för att beräkna erforderlig cementhalt. Här beror cementhalten på jordmaterialets torrdensitet, men också på korngraderingen (Vägverket, 1995). Detta ger en indikation på vilken cementhalt som i teorin är lämplig. Detta kan sedan följas upp genom att utföra prover med den beräknade cementhalten, tillsammans med önskad inblandningsjord. Ytterligare prover med 2 % mindre samt 2 % mer cement, registreras med hänsyn till hållfasthet och hållfasthetsutveckling. (Henriksson C.-G. , 1980). Cementhalten måste även korrigeras med hänsyn till humushalten i jordmaterialet. Då cementhalten är bestämd kan optimal vattenhalt bestämmas för utläggningen. Grundprincipen för val av kalk eller cementhalt utförs illustrativt enligt figuren nedan.

#### 3.5.4.2 Kalk

Erforderlig kalkhalt utförs som en standardiserad metod i USA. Det första kriteriet är den minsta mängd kalk som presterar en jordblandning med pH 12.4. Detta kallas också för ”*Eades and Grim-test*”. Efter fastställande av kalkhalten bestäms sedan det behandlade materialets maximala torrdensitet och optimala vattenhalt med den framtagna kalkmängden. Prover utförs av det behandlade materialet och trycktestas efter 24 timmars lagring. Fastställande av hållfasthet görs sedan för att bekräfta den valda kalkhalten mot önskad hållfasthet. (National Lime Association , 2006). Grundprincipen för val av kalk eller cementhalt utförs illustrativt enligt figuren nedan.



Figur 10 – Val av bindemedelshalt vid kalkstabilisering.

### 3.5.5 Frys och tö egenskaper

För att undersöka det stabiliserade materialets påverkan av klimat testas detta genom att frysa/tina i cykler. Detta utförs genom att utföra provkroppar med den tänkta sammansättningen, och utsätta detta för ett antal nedfrysningar och upptiningar. En typisk frys- tö analys innebär krav ansatta för tryckhållfasthet efter 3, 7 och 10 frys-tö cykler. Gränsvärde för hållfasthet varierar beroende på lagertjocklek, lagrets syfte och typ av bindemedel. Efter frys- tö cykler analyseras avnötningar och sluthållfasthet hos materialet, för att avgöra lämplighet i förhållande till klimatet (National Lime Association , 2006).

**Tabell 4- Rekommendationer för hållfasthet vid frys- tö försök för stabiliserade massor, fritt omarbetad (National Lime Association, 2006)**

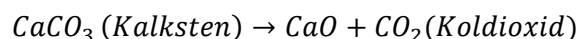
<b>Krav på hållfasthet vid frys- tö försök kalkstabiliserade överbyggnader</b>				
		Frys- tö cykler		
	Fuktmättat prov 8 dagar (kPa)	3 cykler (kPa)	7 cykler (kPa)	10 cykler (kPa)
Hållfasthet (UCS)	900	900	1170	1380
<b>Krav på hållfasthet vid frys- tö försök kalkstabiliserade underbyggnader</b>				
Hållfasthetskrav styv överbyggnad (UCS)	345	345	620	830
Hållfasthetskrav flexibel överbyggnad tjocklek < 25 cm(UCS)	410	410	690	900

---

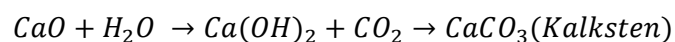
### 3.6 Miljö- och energiaspekter

Trafikverket har som målsättning att energieffektivisera infrastrukturhållningen i ett livscykelperspektiv och därmed inkludera energianvändning för byggande, drift och underhåll av vägar, samt trafiken på vägen (Trafikverket-d, 2012). För att kunna uppfylla dessa krav krävs att hänsyn tas till miljöfrågorna redan i planerings- och projekteringsstadiet. Det handlar om att göra hållbara materialval, med avseende på produktion och transporter. Samt att utföra effektiv masshantering och val av hållfasta vägbeläggningar.

När stabilisering av vägar med cement utförs, bidrar detta till en ökad energikonsumtion och ökat koldioxidutsläpp, på grund av att tillverkningsprocessen för cement är energikrävande och släpper ut stora mängder koldioxid. Hälften av den producerade koldioxiden vid cementtillverkning kommer från kalcinering av kalksten. Kalksten är kalciumkarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) som vid hög temperatur sönderdelas till bränd kalk ( $\text{CaO}$ ) och koldioxid ( $\text{CO}_2$ ) (Lagerblad, 2009).



Tillverkning av cement står idag för 4-5 % av världens totala koldioxidutsläpp, men under betongens livslängd kan ungefär hälften av detta utsläpp återbindas till betongen (Svensk Betong, 2012).



Då koldioxid starkt påverkar växthuseffekten måste dessa utsläpp beaktas vid val av konstruktionstyp. Men även om tillverkning av cement medför stor energiåtgång och stora koldioxidutsläpp så är betong ett material med en lång livslängd och ett material som har många byggtekniska fördelar.

Forskning görs även på att byta ut delar av kalk mot talk och på så sätt minskas utsläppen under tillverkning samtidigt som mer koldioxid kan bindas till konstruktionen under dess livslängd (Dahlquist, 2010).

---

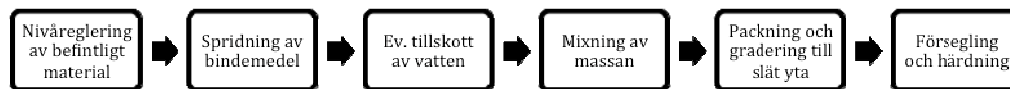
## 4. Säkerställande av kvalitet och bärighet

*Detta avsnitt behandlar de kontrollmetoder som kan användas vid produktion för att säkerställa konstruktionens utformning och beständighet. Kontrollmetoder utförs på de olika delmomenten i produktionen och behandlas utifrån de arbetsmoment som de ingår i. Sveriges regelverk tillämpas utifrån vad som beskrivs om kontrollmetoder för stabiliserade lager. Kapitlet är speciellt riktat mot markblandade massor.*

### 4.1 Arbetsprocessen

Kvalitetssäkring av en stabiliserad konstruktion börjar redan i planeringsstadiet och fortsätter under produktionsfasen samt under hela vägens tekniska livslängd. I planeringsstadiet bestäms de tekniska egenskaper på material och utformning som krävs för att det stabiliserade lagret ska få den beständighet och kvalitet som eftersträvas. I produktionsstadiet säkras sedan dessa egenskaper genom kvalitetsmått på materialets egenskaper och på arbetsutförandet. Kontroll av vägkonstruktionen fortsätter sedan kontinuerligt tills dess tekniska livslängd är slut.

De kontrollmetoder som utförs relaterar i stor grad till den arbetsprocess som en stabilisering innefattar. Auststab (2006) beskriver i en av sina arbetsspecifikationer huvuddelarna under produktionsfasen vid stabilisering.



Figur 11 - Arbetsprocessen för stabilisering

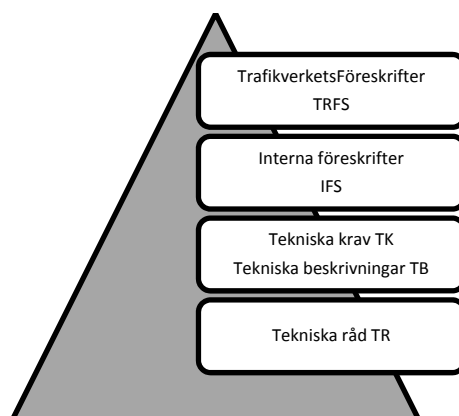
Behandling och nivåreglering av underlaget som ska stabiliseras är den första delen i processen. I denna fas ges ytan en lättare packning för att åskådliggöra eventuella inhomogeniteter och för att den utrustning/maskiner som ska användas kan föras på ytan utan att stora sättningar uppstår. Ytan behandlas till den nivå som den färdiga konstruktionen är avsedd för. När detta är utfört sker nästa fas i produktionen, bindemedelsspridningen. Spridning ska ske under kontrollerade former där en precis mängd per ytenhet ska appliceras, det är viktigt att denna bindemedelsmängd säkerställs. Efter det att spridningen har utförts påbörjas nästa fas, mixningen. Då sker inblandning av bindemedel till det djup som motsvarar lagrets tjocklek. Under mixningen sker tillskott av vatten under kontrollerade former, där en precis mängd vatten ska spridas över ytan samtidigt som materialet mixas, till ett förutbestämt fuktinnehåll. Det är väsentligt att detta fuktinnehåll är inom de gränser som förutsatts och att djupet blir det tänkta. Som nämnt i avsnitt 3.3 är det just djupet på konstruktionen och inhomogeniteter som mest inverkar på konstruktionens beständighet. När bindemedel och jordmaterialet är mixat sker packning av materialet. Det är viktigt att packningens kvalitet kontrolleras, i synnerhet packningsgraden. Efter geometriska kontroller hårdas ytan. (Auststab, 2006)

Varje del av processen kräver kontroll och tillsyn för att säkerställa den färdiga konstruktionens beständighet i den tekniska livslängden. Även om tillverkningsprocessen anses slutförd efter att lagret förseglats, sker en härdning och hållfasthetstillväxt i det stabiliserade materialet. Full hållfasthet uppnås normalt 28 dygn efter slutförandet. Att kontrollera hållfasthetsutveckling och att säkra dess slutvärde är även det en viktig aspekt i arbetsprocessen.

## 4.2 Sveriges Regelverk

### 4.2.1 Övergripande styrdokument

En ny struktur har införts för tekniska regler för vägbyggnad. Den nya strukturen innebär en klar avskiljning mellan vad som är krav för en konstruktion och vad som är råd. Trafikverkets föreskrifter (TRFS), är de primärt styrande dokumenten under svensk lagstiftning. Sedan finns också interna föreskrifter (IFS), där beskrivs de tekniska krav och beskrivningar som finns för vägkonstruktioner (TK och TB). Som stöd till dessa finns också tekniska råd (TR). I vissa fall refereras i dessa föreskrifter till andra dokument skrivna av Trafikverket själva, till exempel metodbeskrivningar men även till dokument från externa organisationer såsom arbetsbeskrivningar från den svenska byggsektorn. Strukturen för Trafikverkets dokument illustreras i figuren nedan.



Figur 12 - Hierarkin i det svenska regelverket för vägbyggnad



---

#### 4.2.2 Styrdokument för studien

De övergripande krav och råd som valts för detta examensarbete presenteras nedan.

TRV 2011:072	Trafikverkets Tekniska Krav Vägkonstruktion
TRV 2011:102	TRVAMA Anläggning 10. Trafikverkets ändringar och tillägg till AMA Anläggning 10.
IFS 2009:2	Trafikverkets interna föreskrift om tekniska egenskapskrav vid byggande av vägkonstruktion
TRV 2011:073	Trafikverkets tekniska råd Vägkonstruktion
TRV 2011:083	TRVKB 10 Obundna lager. Trafikverkets Krav Beskrivningstexter för Obundna material i vägkonstruktioner
AMA Anläggning 10	Allmän material- och Arbetsbeskrivning för anläggningsarbeten.

Det finns också ett antal metodbeskrivningar som kan användas vid utförande av olika arbetsmoment och provtagningar. Eftersökning av metodbeskrivningar som har tagits ur lagstadgat regelverk visar att det har funnits beskrivningar som riktar sig mot stabilisering av obundna lager.

VVPubl.1987:164	VV Metodbeskrivning 42:1977. Cementstabilisering. Kontroll av spridd cement eller kalkmängd.
VVPubl.1987:160	VV Metodbeskrivning 38:1977. Cementstabilisering. Tryckning av provkroppar med tryckpress.
VVPubl.1987:157	VV Metodbeskrivning 35:1977. Cementstabilisering. Planeringsåtgärder.

De krav som primärt anges för en stabiliserad konstruktion återges i TRV 2011:072 under kategorin obundna lager. Detta kapitel säger att

*”Stabiliserade lager som tillgodoräknas vid dimensionering får ej väsentligt brytas ner av klimat och trafik under den tekniska livslängden.”* (Trafikverket-g, 2011).

---

### 4.2.3 Undersökta moment

Att stabilisera ett obundet lager med cement eller kalk innebär ett produktionsförfarande där varje arbetsmoment behöver kontrolleras. Kravtexter från Sverige utgår från att material som används i förstärkningslager och bärlager levereras förgraderat. Detta är inte fallet vid en markstabilisering med cement eller kalk. Därmed är riktlinjerna för vilka materialkrav som ställs på en sådan konstruktion något som behöver klargöras. En del arbetsmoment i samband med stabilisering skiljer sig inte från konventionella vägkonstruktioner och är således väldokumenterade vad det gäller krav och toleranser. Vissa av arbetsmomenten skiljer sig dock så pass mycket, att det inte finns någon motsvarighet. Efter studier av svenska regelverk och referenslitteratur beskriven i avsnitt 4.3.1, har följande aspekter valt att analyseras:

- Analys av inblandningsmaterialet
- Spridning av bindemedel
- Mixning
- Packning
- Tillförsel av vatten
- Efterbehandling
- Uppföljningsmetoder (Seismik, Provtryckning av provkroppar, Radar, Plattbelastare)

## 4.3 Referenslitteratur

### 4.3.1 Referensram vid litteraturstudie

Beskrivning av kontroller som ska utföras under produktionsfasen vid anläggande av stabiliserade lager med markblandningsmetoden är bristfälligt dokumenterade. Detta gäller inte bara i svenska skrifter och regelverk, utan bristen på dokumentation gäller även i andra länder. Kunskapen om detta finns huvudsakligen i de företag som utför produktionen av stabiliserade lager och inte i lagstadgade regelverk. Det finns en del litteratur som beskriver stabilisering med bindemedel utifrån vilka kontroller som bör utföras. Dessa är ofta också kopplade till de arbetsmoment som utförs. Nedan beskrivs den huvudsakliga referenslitteratur som har använts för att sammanfatta de kontroller som utförs under arbetskedet och för att sätta dessa i rätt kontext.

Vägverket (1995)

Finska Vägverkets handbok. Beskriver kontrollmetoder både för platsblandad och verkblandad massa, vid nybyggnad och förstärkning. Denna skrift är välkänd och också beskriven av Nordiska Vägtekniska Förbundet (1980) som en bevisad handling för uppförande av väl fungerande stabiliseringar.

Statens Vegvesen (2011)	Beskriver Norska krav för stabiliserade massor av cementbundet grus (CG) och cementbundet krossmaterial.
Henriksson (1980)	Behandlar cementstabilisering av grus.
AustStab(1999)	Riktlinjer för stabilisering i Australien.
AustStab (2006)	Beskrivning av arbetsprocessen vid stabilisering av lokalgator i Australien.
Lindh(1967)	Fallstudie från Vårgårda 1967 med förslag till kontrollprogram.
(Vägverket, 1987)	Metodbeskrivning av spridd cement- eller kalkmängd.
(Vägverket, 1987)	Metodbeskrivning för huvudsaklig planering vid stabilisering.
Little (2004)	Konstruktionsmanual för stabilisering med kalk i USA
(Little N., 2000)	Testprocedur för materialparametrar i USA.
(Adaska S. & Luhr R., 2004)	Rapport om materialparametrar och dess inverkan på reflektionssprickor vid stabiliseringsarbeten.

#### 4.3.2 Krav från svenska normer

I huvudsak ställer Trafikverkets föreskrifter krav på:

- Material som används, både det levererande och det färdigbehandlade.
- Nivå, lagertjocklek, tvärfall, och ojämnhet i längsled på färdig väg.
- Bärighet, packningsgrad och utförande av packning.

### 4.3.3 Viktiga parametrar att kontrollera vid stabilisering

Regelverk i Sverige, Finland och Norge samt fallstudier och rapporter från Sverige, USA och Australien beskriver de kontrollmetoder som är aktuella för stabilisering med cement och kalk. Genom kartläggning av kontrollmetoder som nämns i dessa dokument, kan en bild av de mest frekvent förekommande avgöras. Dessa är noterade som understrukna.

Tabell 5 - Parametrar som bör kontrolleras vid stabilisering

Material	Arbetsutförande
Kornstorleksfördelning	<u>Hållfasthet</u>
<u>Hållfasthet</u>	Bredd
Plasticitetsindex (PI)	Jämnhet
Vatteninnehåll	Tvärfall
Organisk halt	Höjdnivå
Densitet	<u>Packningskontroll</u>
Bindemedelshalt	<u>Spridning av bindemedel</u>
Bindemedelstyp	<u>Bärighetskontroll</u>
Frys- tö egenskaper	<u>Mixning</u>
pH	<u>Försegling</u>
	<u>Jordprover</u>
	<u>Lagertjocklek</u>

### 4.4 Kontroller för stabiliserade lager

De kontroller som ska utföras vid utförande av stabiliserade vägkonstruktioner kan delas upp i två typer, *materialkontroller* och *utförandekontroller*. Materialkontroller innefattar analys av samtliga ingående material i den stabiliserade konstruktionen mot riktvärden för beständighet och bärighet. Utförandekontroller innefattar kontroller av de arbetsmoment som ingår vid tillverkningen. De främsta produktionskontrollerna som utförs under produktion är kontroll av *bindemedelshalten*, *vattenhalten*, *lagertjockleken*, *packningsgraden* och *tryckhållfastheten*. Även kontroller av *materialen* som används görs (Henriksson C.-G. , 1980) .

- *Bindemedelshalten* kontrolleras direkt och kontinuerligt i spridarutrustningen, men även som stickprov för en viss tid eller yta med hjälp av invägning av materialet över en känd yta.
- *Vattenhalten* kontrolleras antingen med snabbare metoder direkt i fält eller genom torkning och invägning i laboratorium.
- *Lagertjockleken* utvärderas vanligtvis genom att inspektera håltagningar och kontrollera inhyvlingen under produktionen.
- *Packningsgraden* utvärderas antingen med snabbare metoder direkt i fält, eller genom analys i laboratorium.
- *Tryckhållfastheten* utvärderas med oförstörande provning såsom seismik eller med provtryckningar av borrhävar.

## 4.5 Kontrollmetoder

Nedan följer grundläggande teori kring de kontroller som utförs under byggfasen vid utläggning av stabiliserade lager.

### 4.5.1 Fuktinnehåll

Fuktinnehåll är en väsentlig faktor vid arbete med jordmaterial. I synnerhet är finkorniga jordar känsliga för den vattenkvot som de innehåller, då egenskaper kan variera mellan fast, plastiskt och flytande uppförande beroende på vatteninnehåll. Vid packning av material är vattenkvot en viktig parameter, då en för hög eller låg vattenhalt reducerar packningens resultat (Hon, 2010).

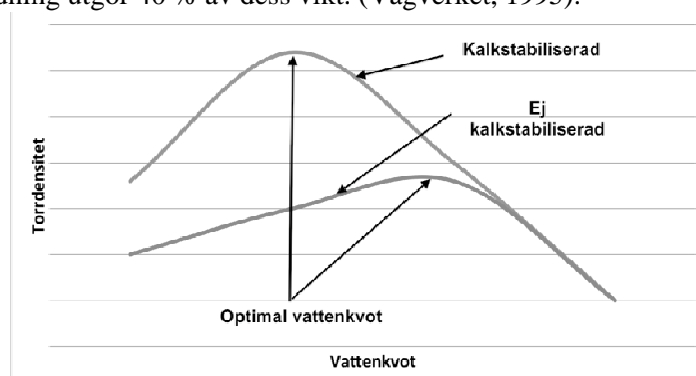
Vattenhalt definieras som förhållandet mellan den fria vattnets vikt och den totala vikten av det fria vattnet och den fasta fasen

$$\text{Vattenhalt} = \frac{\text{Vikt av det fria vattnet}}{\text{Vikt av det fria vattnet} + \text{Vikt av den fasta fasen}} \quad (\text{Ekv. 4})$$

I litteraturen används också benämningen vattenkvot. Denna definieras som förhållandet mellan det fria vattnets och den fasta fasens vikt.

$$\text{Vattenkvot} = \frac{\text{Vikt av det fria vattnet}}{\text{Vikt av den fasta fasen}} \quad (\text{Ekv. 5})$$

För varje fraktionstyp finns en optimal vattenhalt. Generellt gäller att vattenhalten ökar med minskande fraktionsstorlek. Att tillsätta cement eller kalk sänker den optimala vattenhalten för materialet. Maximal torrdensitet och därmed maximal hållfasthet uppkommer vid en optimal vattenhalt och vid en viss cement/kalkhalt. Genom interpolation ges optimal vattenhalt, se figuren nedan. Exemplet är endast en principfigur för en bestämd cementhalt och fraktionsfördelning. Vid den optimala vattenhalten uppnås också den största möjliga hållfastheten för vald bindemedelshalt och de bästa packningsförutsättningarna. Vid stabilisering med hydrauliska bindemedel finns en ny faktor med i bilden, nämligen den att själva bindemedlet också kräver en viss mängd vatten för att hydratisera. Det vatten som krävs för cements härdning utgör 40 % av dess vikt. (Vägverket, 1995).



Figur 13 - Principfigur optimal vattenkvot

---

#### 4.5.2 Packningsgrad

Packning är en väsentlig metod för att öka ett materials bärighet. En väl utförd packning resulterar i en ökad beständighet och livslängd, men även minskad vattengenomsläpplighet och eftersättningar. Packningens resultat blir bättre om den utförs under optimala fuktförhållanden (se avsnitt 4.5.1) i synnerhet för finkorniga jordarter (Hon, 2010)

Kontroll av utförd packning beskrivs med termen packningsgrad ( $R_D$ ). Packningsgraden beskrivs som förhållandet mellan torrdensiteten och maximala torrdensiteten vid tung instampning eller vibrering. Maximal torrdensitet bestäms på laboratorium utifrån jordprover. Packningsgraden ligger mellan 0,5 – 0,7 för lös utfyllnad och är cirka 1,0 vid hård packning (Larsson, 2008).

$$R_D = \frac{\rho_d}{\rho_{d,max}} [-] \quad (\text{Ekv. 6})$$

$\rho_d$	Torrdensitet
$\rho_{d,max}$	Maximal torrdensitet vid tung stampning eller vibrering

---

### 4.5.3 Luftporhalt

Luftporhalten beskriver förhållandet mellan luftporvolymen och den totala volymen i procent. Luftporhalten används som ett kvalitetsmått för den färdiga utläggningen och kan vara ett komplement till beskrivning av packningsgraden. Ekvationen nedan beskriver hur hålrumshalten kan beräknas (Larsson, 2008).

$$L_p = 100 \cdot \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}\right) - w \cdot \frac{\rho_d}{\rho_w} [\%] \quad (\text{Ekv. 7})$$

$L_p$	Luftporhalt
$\rho_b$	Jordmaterialets torrdensitet [ton/m <sup>3</sup> ]
$\rho_s$	Jordmaterialets kompaktdensitet [ton/m <sup>3</sup> ]
$\rho_w$	Vattnets densitet [1 ton/m <sup>3</sup> ]
$w$	Vattenkvot [%]

### 4.5.4 Bindemedelsmängd

Cementmängden och kalkmängd mäts som spridd cementmängd per yta och är en viktig faktor vid tillverkning av det stabiliserade lagret. Cementmängd beräknas utifrån inblandningsmaterialets torrdensitet, lagrets tjocklek och cementhalten som:

$$S_V = 0,01 \cdot S \cdot \rho_k \cdot h \text{ [kg/m}^2\text{]} \quad (\text{Ekv. 8})$$

$S_V$	Erforderlig cementmängd [kg/m <sup>2</sup> ]
$S$	Vald bindemedelshalt [%]
$\rho_k$	Inblandningsmaterialets torrdensitet [ton/m <sup>3</sup> ]
$h$	Lagertjocklek [m]

### 4.5.5 Utvärdering av hållfasthets- och bärighetsegenskaper

*Olika utvärderingsmetoder för E- moduler ger unika resultat för varje metod. Detta måste tas hänsyn till då det inte nödvändigtvis går att direkt jämföra resultat från olika mätmetoder.*

#### 4.5.5.1 Provtryckning

Provtryckning ger ett direkt mått på materialets tryckhållfasthet. En cylinder tillverkas antingen av det recept som gäller eller så används kärnborrade prov direkt från den färdiga massan. Provtryckning sker sedan i laboratorium, med hjälp av en anordning bestående av hydraulisk kolv och belastningsplattor. Provet belastas till brott, med ett känt tryck varvid den kompressiva styrkan på provet kan avläsas.

#### 4.5.5.2 Tung fallviktsdeflektometer

Fallviktsdeflektometer (FWD) simulerar ett tungt passerande fordon såsom en lastbil och ger en bild över vägens bärighet. En fallvikt med tyngd 50 kN och diameter 300 mm släpps på materialet, varvid accelerometrar mäter deflektioner en känd sträcka från vikten. Styvhetsmodulen som beräknas är unikt för metoden och utgår från ett halvoändligt medium och beräknas enligt:

$$E_r = 2(1 - \nu^2) \cdot \frac{\sigma_0 a^2}{r d_r} \quad (\text{Ekv. 9})$$

$E_r$	Ytmodulen på avstånd $r$ från lasten
$\nu$	Poissons tal
$\sigma_0$	Kontakttrycket under belastningsplattan
$a$	Radien för belastningsplattan
$d_r$	Nedsjunkningen för avstånd $r$
$r$	Avståndet från tryckplattan till deflektometer

Med antagandet att deflektionerna på avståndet  $r$  från lasten är samma på djupet  $r$  under lasten, kan styvhetsmoduler för alla godtyckliga punkter i vägprofilen beräknas. Beräkningarna utgår från en känd teoretisk modell där lagertjocklekar är kända. Elasticitetsmoduler för varje lager antas och passas mot de uppmätta deflektionerna, till en acceptabel passning åstadkoms. Passningsräkningen ger moduler för samtliga lager i vägkonstruktionen, och även dess tjocklekar (Agardh, 2012). Även högre laster än 50 kN kan användas för mer belastade ytor, till exempel på flygplatser där stabilisering är vanligt.

#### 4.5.5.3 Plattbelastare

Plattbelastning används för att bedöma styvhet och packning i jordlager. Profilen belastas upp till 500 kPa innan avlastning. De sättningar som uppkommer registrerar tryck- sättningsdiagram och genom en andragradspassning kan en deformationsmodul beräknas ( $E_{v1}$  och  $E_{v2}$ ).  $E_{v1}$  motsvarar modulen för den första belastningsserien och  $E_{v2}$  den andra. Dessa styvhetsmoduler är unika för provmetoden. Med plattbelastare kan packningsgrad och deformationsmodul utvärderas. Packningsgraden bedöms efter kvoten  $E_{v2}/E_{v1}$ , där en hög kvot indikerar på dålig packning (Hon, 2010). Tryck-sättningskurvan approximeras med andragradspolynom enligt

$$s = a_0 + a_1 \sigma_0 + a_2 \sigma_0^2 \quad (\text{Ekv. 10})$$

$s$	Sättning i belastningsplattans centrum (mm)
$\sigma_0$	Medelnormalspänningen under plattan ( $\text{MN/m}^2$ )
$a_0, a_1, a_2$	Konstanter i andragradspolynom

Deformationsmodulen beräknas sedan enligt

$$E_v = 1,5 \cdot r \cdot \frac{1}{a_1 + a_2 + \sigma_1^{max}} \quad (\text{Ekv. 11})$$

$E_v$	Deformationsmodul (MPa)
$r$	Belastningsplattans radie (mm)
$\sigma_1^{max}$	Maximal medelnormalspänning vid första belastning ( $\text{MN/m}^2$ )

Plattan som används är alltid av diameter 300 mm (Vägverket, 1993).



---

#### 4.5.5.4 Seismik

Seismiska vågor delas in i 3 olika typer; kompressionsvåg P, skjuvvåg S och ytvåg R. Det finns ett samband mellan ett materials skjuvvågshastighet, skjuvmodul och dess elasticitetsmodul (Ryden, N, 2011). Elasticitetsmoduler som uppmäts med seismik gäller obelastade tillstånd. Obundna material är dock ofta spänningsberoende.

Skjuvmodulen beror av materialets densitet och skjuvvågshastighet enligt

$$G = \rho V_s^2 \quad (\text{Ekv. 12})$$

$\rho$	Materialets densitet
$V_s$	Skjuvvågshastigheten i materialet

Elasticitetsmodulen för materialet erhålls sedan som

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (\text{Ekv. 13})$$

$G$	Materialets skjuvmodul
$\nu$	Poissons tal

#### Ytvågsseismik

Ytvågsseismik används i fält för att utvärdera en lagerprofils egenskaper och dimensioner. Ytvågen är den seismiska våg som har mest energi och är således enklast att registrera. Med antagandet om att en ytvåg tränger ned motsvarande en våglängd kan lagerprofilens våghastigheter utvärderas med hjälp av passningar mellan dispersionskurvor från en känd teoretisk modell och från praktiska försök. Profilen kan sedan utvärderas och seismiska våghastigheter erhålls för olika lager. Våghastigheterna kan sedan ställas i proportion mot de elasticitetsmoduler som de presterar (Ryden, N, 2011).

#### Resonansseismik

För laborationsprover av borrhärdar och provcylindrar kan resonansseismik användas. Detta innebär att elasticitetsmodulen (Youngs modul) beräknas utifrån:

$$E = \rho(2f_{rp}L)^2 = \rho(V_P)^2 \quad (\text{Ekv. 14})$$

$E$	Youngs modul
$\rho$	Materialprovets densitet
$f_{rp}$	Resonansfrekvens
$L$	Provets längd
$V_P$	Kompressionsvåghastighet

Det ska understrykas att de moduler som uppmäts, är i obelastat tillstånd.

(Toohey, Mooney, & Rydén, 2010)

---

#### 4.5.6 Lagertjockleksmätning med Radar (GPR)

En radarutrustning består av en signalgivare och en eller fler sändare samt mottagarantennerna. Med en av användaren förutbestämd frekvens sänds radiovågor genom ett material med en hastighet motsvarande

$$V_m = \frac{c}{(\frac{\epsilon_r \mu_r}{2}((1+p^2)+1))^{1/2}} \quad (\text{Ekv. 15})$$

c	Ljushastigheten i det fria rummet
$\epsilon_r$	Relativ dielektricitetskonstant
$\mu_r$	Relativ magnetisk permeabilitet
P	Förlustfaktor

Hastigheten i ett medium beror på vågutbredningshastigheten, den relativa magnetiska permeabiliteten och den relativa dielektricitetskonstanten. Olika material innehåller olika dielektricitetskonstanter. Kontrast i dielektricitetsstal mellan två medium ger upphov till en reflektion (kallad R). Ju större denna kontrast är, desto större blir reflektionen av den utsända energin. Reflektionen kan beräknas utifrån skillnaden mellan hastigheter i medium enligt:

$$R = \frac{V_1 - V_2}{V_1 + V_2} \quad (\text{Ekv. 16})$$

eller

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_2} - \sqrt{\epsilon_1}}{\sqrt{\epsilon_2} + \sqrt{\epsilon_1}} \quad (\text{Ekv. 17})$$

$V_1$	Radarvågshastigheten i ett första medium
$V_2$	Radarvågshastigheten i ett andra medium
$\epsilon_1$	Dielektricitetsstal i ett första medium
$\epsilon_2$	Dielektricitetsstal i ett andra medium

Med hjälp av radarsignaler kan profiler utvärderas i väggkroppen och lager urskiljas med hänsyn till dimensioner och materialegenskaper. Användbarheten för radar beror helt på det undersökta materialets egenskaper. Speciellt leror är så pass absorberande för radarvågor att utvärdering av dessa med hjälp av radar är svårt (Reynolds, 2011).

Tjockleksbestämningar med hjälp av radar görs med hjälp av bredden av den transmitterade pulsen T, den dielektriska konstanten för aktuellt lager och ljushastigheten (AL-Qadi & Lahouar, 2005).

$$\Delta d = \frac{cT}{2\sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{Ekv. 18})$$

Radar kan endast användas i strukturer där varje lager har en kontrast i elektriska egenskaper gentemot nästliggande. Den optimala strukturen för radarmätningar av väg är asfaltslager följt av överbyggnad av granulärt material och en terrass av leriga jordarter, där skillnaden i dielektricitetsstal är stort. I lagerstrukturer med liknande

dielektricitetstal för lager såsom granulärt material över en sandig-grusig terrass eller betong över cementstabiliserat bärlager, blir kontrasterna små och svåra att utvärdera. Radar används inom vägbyggnadstekniken till största delen för avgörande av lagertjocklek. Lagertjocklek utvärderas genom att utvärdera refrakterad energi från de elektromagnetiska vågor som sändaren skickar. Varje lager som har en elektrisk kontrast ger en refrakterad våg. Mottagen signal kan utvärderas ur radargram och lagertjocklekar beräknas under antagandet att halva responstiden dividerat på radarvågornas hastighet utgör lagrets tjocklek. Även om lagertjocklekar är den vanligast förekommande mätparametern, kan radar också användas som kvalitetsverktyg. Materials densiteter och andra egenskaper är starkt kopplade till det dielektricitetstal de presterar. Likaså kan skadekarteringar göras med radar för inventeringar av sprickor och sprickutveckling, frostsador, separationer, hålrum, sättningar och urlakningar. Även kloridinnehåll kan fastställas med hjälp av radarmätningar. (Saarenketo & Scullion, 1994)

#### **4.5.7 Isotopmätare (Nuclear Gauge) för utvärdering av materialegenskaper**

Isotopmätare mäter med hjälp av strålning ett materials fukt och densitetsegenskaper. Med en isotopmätare kan skrymdensitet, torrdensitet, vattenkvot, hålrumshalt, luftporhalt och packningsgrad utvärderas direkt i fält. (Troxlerlabs, 2012).



**Figur 14 - Isotopmätare som används vid ombyggnad av E22, delsträcka Hörby N - Linderöd.**

---

## 4.6 Kontroller för stabiliserade lager vid tillverkning

### 4.6.1 Spridning av bindemedel

#### 4.6.1.1 Övergripande utförande

Spridning av kalkstabilisatorer för markblandning sker på olika sätt beroende på om stabilisering sker med bränd kalk ( $\text{CaO}$ ), släckt kalk ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) eller en slurry. Bränd kalk kan spridas med flakbil för hela släpets bredd eller under mer kontrollerade former med en separat spridarutrustning. Släckt kalk sprids under samma förutsättningar som beskrivs för cementstabilisering och slurry sprids vanligen med tankbil på grund av dess lägre koncentration av kalk. Little (2004) nämner att tryckgivare som hjälpmedel på spridarutrustningen är att föredra då spridningen blir jämnare fördelad.

Spridning av cement sker med speciell utläggningsutrustning. Utrustningen innefattade vid stabilisering beskriven av Mattsson (2008) ett släp om  $20 \text{ m}^3$  med speciellt tillverkat spridningsaggregat.



Figur 15 - Spridning av cement vid ombyggnad av E22, delsträcka Hörby N - Linderöd.

#### 4.6.1.2 Kontroll av cementshalt

Att rätt mängd sprids per ytenhet ger möjlighet till en homogen konstruktion. Då säkringen endast är av planprofilbasis, beror det sedan på mixningens utförande för hur homogen det stabiliserade lagret blir. Dåvarande Vägverkets metodbeskrivning 35:1977 behandlar cementstabilisering och nämner kontroll av cementshalt som ett krav. Kontroll av cementshaltens gränsvärde ska då ske med fjädervåg och duk eller våg och plåt enligt metodbeskrivning 42:1977 (Vägverket, 1987).

Finska vägverkets handbok beskriver hur kontroll av cementshalten utförs i byggfasen för markblandningsmetoden. Då vägs med hjälp av en textilduk över en känd yta och en våg, ett färdig spritt bindemedelsprov. Provet bekräftar om rätt mängd cement har spridits (Vägverket, 1995). Enheten är  $\text{kg/m}^2$ , då djupet för konstruktionen är känt.

---

Gränsvärdet för metoden med duk är maximalt  $1 \text{ kg/m}^2$  avvikelse från riktvärdet för ett enskilt prov. Prov görs på var påbörjad  $500 \text{ m}^2$  yta vid start, därefter minst var  $4000 \text{ m}^2$  under arbetets gång (Vägverket, 1995).

Auststab (1997) beskriver tre procedurer för att kontrollera den spridda cementmängden. Mätningen kan utföras direkt i spridarfordonet med hjälp av lastceller. Med en känd bredd på spridarmunstycket, en känd spridningssträcka samt känd utspridd mängd cement kan spridd mängd i  $\text{kg/m}^2$  beräknas. Det går också att mäta med tråg med area  $1 \text{ m}^2$  varvid vikten på tråget blir den utspridda mängden i  $\text{kg/m}^2$ . Godtagbar spridning är överskridande eller underskridande med 10 % i cementvikt per prov. I fallet där spridarmaskinen kontrollerar spridningsmängden elektroniskt, mäts den totala förbrukningen per körrunda, för verifiering. Mätmetoden med duk och våg ska utföras minst dagligen (Auststab, 2006).

Cementhalten beräknas enligt (Vägverket, 1995):

$$M = 0,001 \cdot (m_b - m_a)/A \quad (\text{Ekv. 19})$$

M	Mängd ( $\text{kg/m}^2$ )
A	Plattans/dukens/trågets Area ( $\text{m}^2$ )
$m_b$	Plattans/dukens/trågets vikt inkl. bindemedel (g)
$m_t$	Plattans/dukens/trågets vikt.

#### **4.6.1.3 Kontroll av kalkhalt**

Kontrollen för kalkspridning är identisk med det som Vägverket (1987) beskriver för cementstabilisering, se avsnitt 4.6.1.2. Vid spridning av kalk, oavsett om stabiliseringen omfattar en bränd kalk, släckt kalk eller en slurry kontrolleras spridningsmängden på samma sätt som för cementstabilisering, genom att mäta en utspridd mängd över en känd yta (Little N. D., 2004). Toleranserna är samma som de givna i AustStab (2006).

#### **4.6.1.4 Kontroll av totalförbrukning**

Utöver den kontroll av spridd cementmängd, kontrolleras också den totala cementförbrukning som sker i produktionen. Detta kan t.ex. utföras på dagsbasis, varvid den stabiliserade mängden cement ställs i proportion mot den stabiliserade ytan. Även här anger handboken från Finland att riktvärdet bör ligga  $\pm 1 \text{ kg/m}^2$  per skift från det dimensionerade värdet (Vägverket, 1995). Även Little (2004) nämner att den totala mängd kalk som transporteras till objektet, inte ska överstiga den mängd som tillförs vid utförandeskedet. Toleranser anges ej.

#### **4.6.1.5 Koppling till beständighet**

En för stor cementmängd ger upphov till en ökad vattenkonsumtion, vilket leder till större risk för hydratationssprickor när cementet härdar. Likväl innebär en ökad cementmängd att styvheten ökar i lagret, vilket medför att hydratationssprickor som sker blir färre per längdenhet, men får en större vidd än för lager med lägre cementhalt (Adaska S. & Luhr R., 2004). Cementhalten inverkar inte proportionellt lika mycket på sprickbildningen som vattenhalten gör. Vid större överskott av cement

i underskott av vatten ökar krympningen, varvid sprickbildning ökar. Likaså ökar också styvheten för lagret, vilket ger vidare sprickor (Halsted, E., 2010). Med hänsyn till kalkstabiliserings annorlunda härdningsmekanismer och lägre sluthållfasthet är inte dessa sprickor lika påtagliga för denna typ av stabilisering. Mekanismerna är dock helt identiska.

Bindemedelhalten har stor inverkan på konstruktionens sluthållfasthet. Vid underskott av cement sjunker sluthållfastheten och vid överskott ökar den. Detta med konstruktions problem som följd, en ökad hållfasthet är inte alltid att fördra då hela väggkroppens konstruktion utgör en avvägning i bärighet för att ta hänsyn till reflektionssprickor.

#### **4.6.2 Tillsats av vatten**

##### **4.6.2.1 Utförande**

Erforderlig vattenhalt eller vattenkvot har vid en förstudie fastställts för vald cementhalt och önskad hållfasthet. Tillsats av vatten kan ske på två sätt. Antingen tillsätts vatten innan mixningen sker av materialet eller under mixningen. Fackorganisationer har olika uppfattning om vilken metod som lämpar sig bäst. Skriften från Finland anger att huvuddelen av vattentillförsel sker innan mixning. Eventuell korrigerigering av fukthalt sker sedan i samband med mixningen (Vägverket, 1995).

AustStab (1999) anser istället att all vattentillförsel ska ske vid mixningen för att säkra ett homogent resultat. Vatten tillförs massan efter det att stabilisatorn har spridits. Tillförseln bör ske med hjälp av specialmaskiner där vatten sprids under tryckkontrollerad rotormixning eller mixning i trumma. Denna metod främjar homogeniteten. Andra metoder ger inte bra resultat anser AustStab (1999). Vattentillförsel på detta sätt involverar ett tanksläp som är kopplad till infräsningsmaskinen.

Vattnet som tillsätts får inte innehålla humus, då detta påverkar härdningsförloppet negativt. Vattnet får inte heller innehålla mer än 0,03 viktprocent klorider. (Vägverket, 1995) Vattnets kvalitet är viktigt för hållfasthetstillväxten vid kalk- och cementstabilisering. Vattnet som används ska vara fritt från organiska material, alkali, syror och oljor (Auststab, 2006).



**Figur 16 - Spridning av vatten vid ombyggnation av E22, delsträcka Hörby N - Linderöd.**

---

#### **4.6.2.2 Kontroll av vatteninnehåll**

Little (2004) skriver att 3 % mer vatten över optimal vattenhalt bör påföras innan mixning vid kalkstabilisering för att främja hydratationen. Fukthalten bör ligga runt 80 – 110 % av den optimala för markblandning efter mixningen, både för cementstabilisering och kalkstabilisering enligt Auststab, 2006. Handboken från Finska Vägverket anger istället att  $\pm 1$  % av riktvärdet för den optimala vattenhalten ska åstadkommas innan mixningen börjar. Resterande mängd påförs under mixningen.

För direkt avläsning av materialets fukthalt i produktion beskriver Vägverket (1995) att en isotopmätare kan användas. Den lagstadgade metoden för direkt avläsning av vattenkvot enligt Trafikverket är en Speedy Moisture Tester Super 200<sup>TM</sup>. Även utredning av vattenkvot under laborativa förhållanden kan utföras som provberedning enligt metodbeskrivning 1987:162. I fallet med isotopmätare ska denna utföras enligt metodbeskrivning 605:1993.

#### **4.6.2.3 Koppling till beständighet**

Den mängd vatten som tillförs cementet har en direkt inverkan på sluthållfastheten. I synnerhet är vattenandelens förhållande till cementet av intresse, i betongläran det så kallade vattencementtalet, VCT. Om vattenhalten blir för låg i förhållande till cementandelen blir inte hydratationen fullständig och hållfastheten sjunker. För cement innebär detta att cementgelen tar så stor plats i ett tidigt skede att cementet inte hinner hydratisera. Detta medför en för tidig avklingning av hållfasthetstillväxten. Dessutom bidrar bristen på vatten till sprickbildning. Om vattenhalten är för hög blir avståndet mellan cementkornen större varvid porositeten ökar och hållfastheten sjunker (Fagerlund, 1999). En felaktig vattenhalt eller vattenkvot kan medföra en rad problem såsom minskad frostbeständighet, packningsproblem och lägre sluthållfasthet (Henriksson C.-G. , 1980). Frostbeständigheten påverkas framför allt av en för låg vattenmängd då porositeten blir så låg att vattnet inte tillåts expandera vid frysning.

### **4.6.3 Mixning**

#### **4.6.3.1 Utförande**

Mixning sker efter att bindemedel har spridits över jordmaterialet. Mixningen sker antingen med rotor som fräser upp det bindemedelförsedda materialet samtidigt som vatten tillförs. En homogen utförd mixning är viktig då den starkt påverkar konstruktionens homogenitet och därmed dess slutliga egenskaper. AustStab (1999) påpekar att utrustningen för mixning också ska inneha teknik för att tillföra vatten, så att detta sker samtidigt med mixningen. Detta ställer krav på rätt inställda givare för munstycken och kontroll att detta stämmer i praktiken.

Vid stabilisering med rotor motsvarar djupet för stabiliseringen av dess radie. Vid mixning med hyvelutrustning, hyvelns djupnedträngning.



Figur 17 - Infräsning av cement vid ombyggnad av E22, delsträcka Hörby N - Linderöd.

#### **4.6.3.2 Djupkontroll**

Kontroll av djupet görs normalt genom jämförelse mellan maskinens arbetsdjup och materialets tjocklek. Enligt AustStab (2006) godtas mätvärden inom  $\pm 20$  mm av riktvärdet för lagrets tjocklek och mätvärdets noggrannhet ska avrundas till närmaste 5 mm.

#### **4.6.3.3 Homogenitetssäkring under mixningens utförande**

Homogeniteten säkras genom att försäkra att rätt antal överfarer har gjorts med mixningsutrustningen. Homogeniteten beror mest på utrustningens effektivitet och antalet överfarer. Homogeniteten är starkt beroende av den utrustning som används. Ju modernare och tyngre utrustning desto färre överfarer krävs. Rekommendationen är mellan en till fem överfarer per läggning (Vägverket, 1995).

#### **4.6.3.4 Koppling till beständighet**

Mixningen är en av de viktigaste parametrarna i en stabilisering. Om mixningen inte utförs på ett rätt sätt blir homogeniteten inte tillräcklig och egenskaperna för det stabiliserade lagret blir inte som tänkt. En inhomogen sträcka bidrar till den problembild som finns för konstruktionen och leder till sättningar och sprickor.

### **4.6.4 Packning**

#### **4.6.4.1 Utförande**

De obundna lagren i överbyggnaden bidrar väsentligt till vägens hållfasthet. Normalt sett ställer detta höga krav på packningskvaliteten och packningsgraden på dessa lager. Packningen kan ske med många olika metoder, dock finns det procedurer som specifikt passar ett cementstabiliserat lager.

Packning sker efter det att det mixade lagret färdigställts till det djup som bestämts och vatten har tillförts. En fördröjning av packningen med fyra dagar är acceptabelt för kalkstabiliserade lager (Little N. D., 2004). Finsk handbok anger att packning sker direkt efter inblandning. Detta sker då med gummihjulsvält för de första



överfarterna, på grund av störningsbenägenheten för det underliggande materialet. Efter överfart med gummihjulsvält kan sedan packningen ske med vibrationsvält. Rekommenderat antal överfarter är tre stycken. Efter detta sker profilering och utjämning med väghyvel med efterföljande efterpackning. Vid efterpackning bör hänsyn tas till det lösa lagrets tjocklek och underliggande mark. (Vägverket, 1995).

Little (2004) skriver att packningsutrustningen vid packning av stabiliserade lager av kalk ska ta hänsyn till dess djup. Packning kan ske med en pneumatisk- eller vibratorbaserad vält, eller en kombination av båda. Den sista packningen utförs med en slät vält (Steel Roller).

Det som är viktigast förutom den uppnådda packningsgraden är att packningen blir konsekvent längs sträckan. Cementstabiliseringen är känslig för differenssättningar, vilket ställer krav på en homogent packad konstruktion.



Figur 18 - Gummihjulsvält som används för ytpackning vid ombyggnation av E22, delsträcka Hörby N - Linderöd.

#### **4.6.4.2 Kontroll av packningsutförandet**

Dynapac AB (1989) kräver en packningsgrad över 98 % (Standard Proctor). Little (2004) rekommenderar en packningsgrad över 95 % vid stabilisering med kalk och den finska handboken kräver en packningsgrad över 97 % för cementstabiliserade lager. I detta fall ska minsta avvikande värde vara 92 % packningsgrad (Vägverket, 1995).

Packningskontroll är väl dokumenterat i de svenska krav och rådtexter som analyserats, därmed behövs ingen ytterligare förklaring till dessa. Ett sätt att bestämma packningsgraden, är med hjälp av isotopmätare. Denna kan ge en direkt avläsning av packningsgraden (Troxlerlabs, 2012). En sådan utrustning kan placeras på packningsfordonet och direktavläsning av packningsgraden för varje godtycklig punkt ges, vilket medför att det vanliga antagandet att kravet på packning motsvarar

---

ett visst antal överfarter blir irrelevant. Istället kan arbetet fortskrida till dess att önskad packningsgrad uppnåtts.

#### **4.6.4.3 Koppling till beständighet**

Lindh (1967) beskriver erfarenheter från att efterbehandla det färdiglagda cementlagret, just då det börjat härda. Erfarenheter säger att en vibrationsvältning vid denna tidpunkt minskar antalet reflekterade tvärsprickor markant som observeras ett par år efter uppförandet. Detta bekräftas också av Adaska & Luhr (2004), som beskriver att en packning ger möjlighet till att packa korn närmre varandra, vilket ger utrymme för en mindre krympning då cementet härdar. Detta med utgångspunkt från att ett stabiliserat material får minst krympning vid maximal densitet och optimal vattenhalt. Likaså har typen av packning inverkan på krympningens omfattning. Packningsutrustning med vibrerande metoder tenderar ge en mindre krympning än statiska.

### **4.6.5 Efterbehandling**

#### **4.6.5.1 Härdning**

Material som har stabiliserats och packats ska efter lämpliga kontroller förseglas för att främja hydratation. Denna försegling ska ske så fort som möjligt. Förseglingen har effekt på den slutliga hållfastheten och beständigheten för ett cementstabiliserat lager och en väl förseglad massa får en större drag och töjhållfasthet gentemot en massa som inte behandlats med försegling. (Adaska S. & Luhr R., 2004). En kalkstabiliserad massa ställer också krav på försegling, då vatten som avdunstar också hämmar de kemiska reaktioner som ger massans hållfasthet.

#### **4.6.5.2 Utförande**

Härdningen kan i stort sett ske på två sätt. Antingen härdas det stabiliserade lagret genom att hållas fuktigt, så kallad fukthärdning. Eller så härdas det stabiliserade lagret genom försegling, så kallad *membranhärdning*. En typ av den förstnämnda lösningen är att kontinuerligt bevattna det utlagda lagret under en veckas tid. Denna metod medför alltså att ovanliggande lager inte kan påföras innan erforderlig bevattningstid har åstadkommit. (Vägverket, 1995). En annan typ av metod som finns är att förse det nylagda lagret med en försegling av asfaltslösning eller liknande, något som Henriksson (1980) nämner. Asfaltslösningen sprids t.ex. med en spridartank. Exempel på mängd anges här till 0,6 kg/m<sup>2</sup>. I fallet då stabiliseringen utgör bärlagret ska också slitlagret påföras så fort som möjligt. En annan typ av membranbehandling är att förse lagret med en hinna av polymeremulsion, vilket bildar en tät hinna som förhindrar avgång av vattenånga. Vid härdning genom bituminös emulsion beskriven ovan anger Little (2004) att en vanlig mängd som appliceras på kalkstabiliserade lager är ca 0,1- 0,25 gallons per square yard. Detta motsvarar ca 0,5- 1,36 liter emulsion per kvadratmeter. Med ett antagande om en densitet av ett ton per kubikmeter för bitumen blir detta 0,5- 1,36 kg emulsion per kvadratmeter. Detta intervall stämmer väl överens med det värde som Henriksson (1980) beskriver för emulsionsförsegling av cementstabiliserade lager. De ovannämnda förseglade lagren ska enligt AustStab (2006) förseglas inom 24 timmar från det att den stabiliserade konstruktionen färdigställts.

---

#### **4.6.5.3 Kontroll av härdning**

Härdningen ingår normalt sett inte som en kontrollpunkt vid produktionsförloppet. Little (2004) nämner dock att inga arbetsmaskiner eller dylikt får föras på den stabiliserade ytan förrän en tillräcklig hållfasthet har uppnåtts för ändamålet. När denna hållfasthet är uppnådd kan härdningen avslutas.

#### **4.6.5.4 Koppling till beständighet**

En stabiliserad konstruktion härdad enligt avsnitt 4.6.5.2 får en större drag- och töjhållfasthet än en lufthärdad sådan. Adaska & Luhr (2004) konstaterar att studier inte har visat att krympningen blir mindre med härdning. Däremot bidrar den ökade hållfastheten till att motstå den krympning som sker med en reducerad sprickbild som följd. Sprickor som uppkommer blir snävare och med större avstånd emellan.

### **4.6.6 Analys av jordmaterialet**

Då markblandningsmetoden omfattar de flesta jordmaterial, handlar det inte om att gradera den perfekta sammansättningen. Istället tas prov för det underlag som ska stabiliseras och utifrån detta får parametrar för stabiliseringen klarläggas. Det står klart från litteratur i vilket kornfördelningsspann som stabilisering lämpar sig, kontrollen sker därför genom att försäkra att jordprover tagna från objektet är graderade inom rekommenderat område eller det område som valts för konstruktionens dimensionerande värden. Vägverket (1995) beskriver den kontrollomfattning som bör ske för kontroll av korngradering. Ett prov var 1000 m<sup>2</sup> bör utföras för försäkring om att kornfördelningen är i rätt kornfördelningsspann.

#### **4.6.6.1 Humushalt**

Om humushalten starkt avviker över gränsvärdet 2%, bör cementhalten eller fukthalten ändras. Detta motsvarar alltså den kontroll som görs i huvudsyfte att reglera cementmängden. Det finns inga direkta förhållanden mellan humushalt och erforderlig cementmängd, endast tumregler. Kontroll kan göras genom utförande av provkroppar, för att bekräfta sina antaganden.

I svensk författning anges också kontroller för inblandningsmaterialet. Den maximala organiska halten som får finnas i förstärkningslager är 2 % och ska undersökas enligt SS-EN 1744-1 avsnitt 15:1 samt SS 02 71 07. Provtagningen ska ske minst en gång per objekt eller en gång per 45 000 m<sup>2</sup> för material som inte uppfyller EG-direktiv, och 90 000 m<sup>2</sup> för material som uppfyller det. För bärlager görs kontrollen ovan istället en gång per objekt eller täkt (Trafikverket- a, 2011).

#### **4.6.6.2 Fraktioner**

Den bindemedelshalt som har bestämts utgår från en specifik korngradering, som har bestämts i en förstudie. Vid markblandning är det av vikt att kontrollera att inblandningsmaterialet följer de gränskurvor som har ansats. Godtagna spanns för fraktionsfördelningar har angivits i avsnitt 3.5.1.

---

#### **4.6.6.3 Koppling till beständighet**

Användning av jordar med stora lerinnehåll kan vara negativt för sprickutvecklingen hos det stabiliserade lagret. Leror där enskilda korn hyser stor yta håller större mängder vatten och ger upphov till sprickor i det stabiliserade lagret. Genom försäkring att ballasten för stabiliseringen följer de gränskurvor som beskrivs i teoriavsnittet minskar risken för problem med tvärsprickor. Finkorniga jordar som stabiliseras såsom leror påvisar att sprickorna som uppkommer blir finare och med större centrumavstånd, gentemot sprickor som uppkommer vid grövre fraktioner. Dock bidrar en finare kornandel till en större specifik yta vilket kräver en större cementtillsats. Detta medför en större vattenhalt och också en större risk för hydratationssprickor. (Adaska S. & Luhr R., 2004)

#### **4.6.6.4 Vind**

Under produktion är det viktigt att kontrollera väderfaktorer. Vindstyrka är en av dessa. AustStab (2006) beskriver att vindstyrkan inte ska vara mer än 25 m/s vid produktion.

#### **4.6.6.5 Temperatur**

Stabilisering får inte utföras då omgivningstemperaturen sjunker under en viss gräns, eftersom härdningsförloppet avstannar och funktionen inte kan säkerställas vid produktion i låga temperaturer. För kalkstabilisering rekommenderar National Lime Association (NLA) en kontinuerlig temperatur över 40<sup>0</sup>F vilket motsvarar 4,5<sup>0</sup>C. Detta krav ska mötas för hela produktionsfasen (Hicks, 2002). Vägverket (1995) anger att denna temperatur kontinuerligt ska vara över 5<sup>0</sup>C för cementstabilisering.

---

## 4.7 Uppföljning med kontroller efter tillverkning

Bärighet- och hållfasthetskontroll utförs efter produktionens färdigställande. Det som är intressant att undersöka är lagrets elasticitet och deformationsegenskaper då det stabiliserade lagret behandlas som en lastbärande del i överbyggnaden. Som regel anses sluthållfastheten uppnås efter 28 härdningsdygn. Det speciella för en stabiliserad konstruktion är att också hållfasthetsutvecklingen bör följas upp med kontroller för ett- och sju dygns hållfastheter och deformationsegenskaper. Även uppföljning med lagertjockleksmätningar och homogenitetsmätningar är av intresse. För detta finns dels oförstörande metoder och förstörande metoder.

- Metoder såsom ytvågsseismik, georadar, fallvikt och plattbelastning kräver inget ingrepp i vägkonstruktionen och är således oförstörande.
- Provtryckning av borrhärdningar är en förstörande provningsmetod. Utifrån provtryckningarna kan värden på så styvhetsmodul, tryckhållfasthet, lagertjocklek och homogenitet utvärderas.

Under förstadiet har det stabiliserade lagrets egenskaper fastställts. Provcylindrar har utförts och sluthållfasthet samt hållfasthetsutveckling har registrerats. Det handlar nu om att följa upp denna utveckling för den praktiska delen av arbetet. Lämpligheten för de olika metoderna vid olika skeden i hållfasthetsutveckling är av intresse. Förstörande prover kan användas som facit för ett antal kända punkter, varvid oförstörande prover kan användas tillsammans med detta underlag för att få en uppfattning om konstruktionens uppförande.

### 4.7.1 Plattbelastning

Plattbelastning ingår i svensk standard som en kontrollmetod för deformations- och packningsegenskaper. Plattbelastning utförs enligt Trafikverkets publ. 1994:41 (Vägverket, 1994).

Tidigare försök med plattbelastning har beskrivits av Mattsson & Hadidpour (2008), för utvärdering av deformationsegenskaper av stabiliserade lager. Här deformerades lagret under 3,5 tons kraft, vilket motsvarar en spänning av cirka 120 kPa. Deformationen som uppmättes var så pass liten att inga slutsatser kunde dras från provningen. Plattbelastning har dock visat sig vara en god metod för att kvalitetsbedöma kalkstabiliserade lager av lera, vid ett test utfört av Akyarh & Kavak (2006). Belastning påfördes tills dess att massan kollapsade (2,5 cm sättning) eller då spänningen från plattan uppgick till 1MPa. Detta är dubbelt så hög spänning som Trafikverket föreskriver för plattbelastningsförsökets maxvärde. Spänningen var också i detta fall drygt åtta gånger större än den spänning som Hadidpour & Mattson (2008) använder.

---

#### 4.7.2 Radar

Radar var inte nämnd som kontrollmetod i referenslitteraturen. Radar är endast tillämpbar då ingående material för varje lager innehåller kontraster i dielektricitetsvärden. Om så inte är fallet, kan ingen profil utvärderas. Al-Qadi & Lahouar (2005) beskriver att radarns säkerhet i mätresultat sjunker kraftigt om tunnare lager ovanlagras de lager som omfattas av mätningen. Detta kan innefatta t.ex. ytstiftlagret.

#### 4.7.3 Fallvikt

Fallvikt nämns inte i referenslitteraturen som ett alternativ till att bestämma hållfastheten i det stabiliserade lagret. Dock är det en metod, där styvhetsmodulen kan bestämmas, och även töjningar i lagret. Fallviktens lämplighet för det stabiliserade lagret är något som diskuteras. För hållfasthetsmätningar anses att fallvikt ger en unik modul, vilken är svår att koppla till materialets hållfasthet. Däremot ger fallviktsmätningar lagrets styvhetsmodul, och även töjningar samt lagertjocklek.

#### 4.7.4 Seismik

En typ av ickeförstörande provning vid värdering av hållfasthet är att använda seismik. I fält används analyser av ytvågseismik för att utvärdera det stabiliserade materialets styvhetsmoduler. I laboratorium kan styvhetsmoduler beräknas med hjälp av resonansmätningar (Free- free resonance (FFR)). Seismik anses av Mooney, Toohey & Ryden (2010) som en metod som ger förutsättning för att säkra hållfasthetsutveckling och sluthållfasthet i en stabiliserad konstruktion.

Seismik kan användas både för att utvärdera hållfasthetsegenskaper i laboratorium för prover och i fält för in-situ undersökningar. I fält utförs seismiska undersökningar genom att mäta första ankomsttider för ytseismiska vågor från en källa. Ett antal accelerometrar med stor precision placeras en känd sträcka från kraftkällan, varvid en hastighet för ytvågen kan beräknas och därmed en elasticitetsmodul. Detta är beskrivet i teoridelen.

I laboratorium utförs mätningar genom resonansmätningar i ett fritt placerat prov, varvid resonansvågens hastighet kan utvärderas och därmed en elasticitetsmodul. Detta är beskrivet i teoridelen.

Seismik utfördes som kontrollmetod för ett stabiliserat bärlager för en lagerlokal i Halmstad. Som gränsvärde sattes en ytvågshastighet som ansågs motsvara det hållfasthetskrav som ställdes på det färdiga lagret. Jämförelser visar dock att den seismiska undersökningen visade på undermåliga hållfastheter, emedan kärnprovtagningen visade på högre hållfastheter än vad som krävdes. (Hadidpour & Mattsson, 2008). Ett arbete av Ryden, Ekdahl & Lindh (2006) påvisar dock efter undersökningar att seismik har visat sig praktiskt att utföra till en låg kostnad för stabiliserade lager. Även Rydén beskriver att seismiken har visat sig fungera på ett tillfredsställande sätt för att avgöra ett stabiliserat materials hållfasthet i fält (Ryden,

---

N, 2012). Korrelationen mellan seismisk hastighet och ett materials hållfasthet är alltså godtagbar.

#### **4.7.5 Borrkärnor**

##### **4.7.5.1 Utförande**

När lagret färdigställs är det viktigt att bedöma utvecklingen och slutvärdet av hållfastheten, vars värde bestämts i förstudien. Den mest använda metoden är att borra ut provkärnor vid ett godtyckligt antal ställen för konstruktionen. Hållfastheten kan sedan ges som ett krav på uppnådd enaxiell tryckhållfasthet. För hållfasthetsutveckling brukar första dygnet och det sjunde vara av intresse. För sluthållfasthet brukar mätningen ske efter 28 dygn. En provkärna undersöks utifrån den hållfasthetstillväxt som registrerats i laboratorium vid förstudien, vid tillverkning av prov för tryckning. Även sluthållfastheten kan jämföras. Därmed är det möjligt att avgöra in situ provets utveckling i förhållande till det teoretiska laboratorieprovet. Etdygns hållfastheterna kan jämföras, vilket ger en indikation på om arbetsreceptet behöver revideras för att uppnå önskad hållfasthet. (Vägverket, 1995).

Den uppnådda tryckhållfastheten kan valideras utifrån en kravnivå på uppnådd tryckhållfasthet vid tryckprovning. En ansats till verifiering är att jämföra provtryckningar med en förutbestämd minsta nivå för hållfastheten. Vid stabilisering i Halmstad utfördes verifiering av tryckhållfasthet enligt denna metod (i detta fall med minimikrav 4 MPa) (Hadidpour & Mattsson, 2008). För att undvika problem som en för hög styvhet medför, bör också ett krav på högsta hållfasthet nämnas.

##### **4.7.5.2 Lämplighet**

Provtryckning av kärnor har länge varit det enda alternativet till att kontrollera materialets hållfasthet och hållfasthetsutveckling under produktionsstadiet. Borrkärnan ger en direkt kunskap om egenskaperna för konstruktionen vid en exakt punkt. Förutom hållfasthet kan också okulära besiktningar utföras för att fastställa homogeniteten för lagret och lagertjockleken.

---

## 4.8 Intervju

### 4.8.1 Ulf Ekdahl, Ekdahl Geodesign AB

Ulf Ekdahl poängterar vid ett möte att kopplingen mellan vägkonstruktionens design och de kontroller som utförs är väsentligt att följa om en lyckad konstruktion ska åstadkommas. Vid jämförelser av hållfasthetsutveckling och mätningar av denna kommenterar Ekdahl att mognadsgradsutvecklingen är viktig att ta hänsyn till. Facktermen är antalet graddygn som konstruktionen varit utsatt för, alltså antalet dygn med 20 graders temperatur. Detta är riktvärdet vid den teoretiska hållfasthetsutveckling som följts i laboratorium och aspekten är viktig att ta hänsyn till om jämförelser ska bli rättvisa mellan fältvärden och värden i laboratorium. Detta är något som inte framkommit i den referenslitteratur som använts. Likaså nämner Ekdahl att provkropparnas geometri vid kärnprovtagning är av stor vikt. Detta har bekräftats av Lindh (2012). Provkropparna ska vara två gånger diametern i längd och diametern ska vara minst fem gånger större än den största partikelstorleken. Ekdahl fortsätter med att poängtera att en stor faktor i de hållfasthetsbekymmer som uppkommer är det ”överlapp” som sker då mixermaskinen kör över en sträcka som redan stabiliserats, varvid en dubbel mängd bindemedel sprids, med problem som beskrivs i avsnitt 4.6.1.5. Det är av största vikt att hålla reda på stabiliseringens perifera delar, för att säkra en homogen konstruktion. Som förslag på åtgärd nämner Ekdahl ett områdeskriterie, med en maximal yta för överlapp för godkänt utförande (Ekdahl, 2012). Detta är också något som inte nämns i referenslitteraturen.



---

## 4.9 Valda kontroller på vägbygget vid E22, riktvärden och resultat

### 4.9.1 Allmänt om kontrollerna vid vägbygget E22

I allmänhet liknar kontrollpunkterna vid arbetsberedningen för stabiliseringen vid E22 Hurva-Rolsberga de som har beskrivits i avsnitt 4.6. Stabilisering utförs här både för terrassmaterialet samt bärlagret, varvid två kontrolluppsättningar har utförts. Principen för dessa är dock densamma. I ett tekniskt PM beskrivs de huvudsakliga kontrollerna som ska utföras. Kontrollerna är antingen fältbaserade eller laboriebaserade.

Laboriebaserade kontroller för stabiliserade lager utgör:

- Kornfördelning och instampningskurvor för stabiliserat krossmaterial med tillhörande torrdensiteter.
- Frys- tö analyser för stabiliserat och förseglat material med luftporhalt mindre än 5 %.
- Provkroppar utförs enligt recept och verifieras med seismikmätningar och tryckhållfasthetsmätningar.

Fältkontroller för det stabiliserade lager utgör:

- Packningskontroll mot riktvärde luftporhalt 5 %. Utförs med Troxler och yttäckande packningskontroll (YPK)
- Tryckhållfasthetsmätningar med seismik. Hållfastheten som uppmäts ska i varje mätpunkt överskrida dimensionerande värde.
- Kontroll av bindemedelsmängd vid spridning
- Kontroll av fräsdjupet

### 4.9.2 Kontroll av stabiliserad terrass

Som ett första moment justeras terrassytan till rätt nivå. Detta utförs med en väghyvel. Toleransen vid utsättningen är  $\pm 25$  mm. Kontrollen utförs med inmätningar var 10:e meter med 3 punkter per sektion. Packning utförs med vält om 13 ton och packningen kontrolleras med yttäckande packningskontroll där lägsta tillåtna Ev2 värde är 40 MPa. De två svagaste punkterna som uppmäts kontrolleras med lätt tysk fallvikt. Vattenkvoten kontrolleras i terrassytan med Troxler-apparatur, där ett mätprov utförs var 50:e meter och med tre punkter per sektion. Detta för att avgöra mängden vatten och cement som krävs. Cementmängden påförs med spridarvagn och kontrolleras med plåt om en kvadratmeter såsom beskrivet i avsnitt 4.6.1. Ytterligare kontroll av vatteninnehållet utförs genom att fräsa ytan på ett antal ställen och kontrollera med Troxler. Kontroll av cementmängden sker genom att mäta den åstadkomna luftporhalten, som inte får överskrida 5 %. Nivån justeras med hyvel och kontrolleras med avseende på nivå. Infräsningsdjupet kontrolleras med linjal och GPS som är monterad på fräsen. Även provgropar ned till terrassbotten kan göras för verifiering.

---

Tiden mellan infräsning av cement och hyveljusteringen bör inte vara längre än två timmar. Toleransen för infräsningsdjupet är 0-2,5 cm från den teoretiska nivån. Vid efterkontroll av nivå ges en tolerans av 0-2 cm från den teoretiska nivån.

#### **4.9.3 Kontroll av stabiliserat bärlager**

Som ett första moment kontrolleras nivån på den tidigare stabiliserade terrassen. Därefter påförs det återvunna krossade materialet som ska stabiliseras på terrassytan, till en höjd motsvarande två cm högre än avsedd färdig nivå. Bevattning sker sedan på det krossade materialet till en förbestämmd luftporhalt uppnås. Bindemedel läggs med spridarvagn i de mängder som angivits, varvid infräsning sker ned till 25 cm djup. Kontrollen av cementspridningen görs med en kvadratmeter plåt, enligt procedur beskriven i avsnitt 4.6.1. Efter spridning av cementet och infräsning av detta justeras ytan till rätt nivå med två totalstationer, varefter packning utförs med två stycken envals vibrovältar om 21 och 13 ton. Detta utförs med en låg amplitud. Som packningskontroll mäts luftporhalten och verifieras mot riktvärdet 5 % med hjälp av Troxler apparatur. En avslutande vältning utförs med statisk gummihjulsvält om 13 ton och nivåerna för det stabiliserade materialet kontrolleras. En ny teknik som tillämpas är att istället för att påföra förseglingsemulsionen, förseglas lagret med betong eller vattnas kontinuerligt i två till tre dagar, som fuktspärr. Fuktspärren ska utföras fyra timmar efter stabiliseringen, om temperaturen under utförandet är 10<sup>0</sup>C. Viktigt är att ingen trafik på bärlagret får förekomma under denna tid. Förseglingen följs av en vältning för att åstadkomma mikrosprickor i det stabiliserade materialet. Hållfasthetsutvecklingen kontrolleras med seismik sju dygn efter stabiliseringens färdigställande. Hållfastheten har getts ett undre gränsvärde av 2,5 MPa och ett övre av 4 MPa. Hållfasthetskontrollen utförs var 500:e m<sup>2</sup>. Tiden mellan asfaltering och stabiliseringen bör dock vara tio dagar.

---

#### 4.10 Resultat utifrån litteraturstudie, kontaktsamtal och fallstudie

Vad som kan konstateras är att det finns ett antal parametrar som är av stor vikt att kontrollera för att säkerställa den stabiliserade konstruktionens funktion och hållfasthetsegenskaper. Dessa är starkt kopplade till själva arbetsmomenten vid stabiliseringsutförandet. Framför allt beskrivs det av vikt att kontrollera bindemedelsmängd, vatteninnehåll, infräsning, packning, efterbehandling, hållfasthetsutveckling, temperatur och inblandningsmaterialets egenskaper. Samtliga givna kontrollparametrar nämns genomgående i referenslitteratur, kontakt med fackmän och kontrollplaner för bygget E22 Hurva-Rolsberga. Kvalitén och bärigheten på det färdiga lagret beror därmed till stor del av nedanstående parametrar

- **Kornfraktionsfördelning** kontrolleras genom t.ex. siktning. Detta kan utföras var 1000:e m<sup>2</sup> utförd yta. Gränsvärdet beror på ett antal parametrar, såsom bindemedelstyp och önskad sluthållfasthet, och bestäms från fall till fall. Tolerans kan inte urskiljas.
- **Frys- och tö egenskaper** kontrolleras genom att utsätta provkroppar med tänkt sammansättning för ett antal frys- och tö cykler. Gränsvärdet är uppnådd tryckhållfasthet för olika antal cykler. Tolerans kan inte urskiljas.
- **Organisk halt** mot gränsvärde  $\leq 2\%$ . Detta kontrolleras med metoder enligt SS-EN 1744-1 var 45 000:e m<sup>2</sup> för fraktioner som inte uppfyller EG-direktiv, och 90 000:e m<sup>2</sup> för fraktioner som gör det. Tolerans kan inte urskiljas.
- **Spridning av bindemedel** kontrolleras genom att en given yta med spritt bindemedel vägs in. Detta kan ske med antingen duk, tråg eller andra liknande don. I vissa fall kan detta även kontrolleras direkt i spridningsmaskinen. Ändock ska kontrollen med duk eller liknande utföras vid vissa intervall. En typisk kontrollomfattning kan vara var 500:e kvadratmeter vid start och därefter vid varje 4000 kvadratmeter utförd yta. Gränsvärdet är den framtagna bindemedelshalten för önskade egenskaper. Toleransen är typiskt  $\pm 1$  kg per kvadratmeter. Den totala produktionen kontrolleras genom att ställa den totalt använda bindemedelsmängden mot utförd stabiliserad yta, med tolerans  $\pm 1$  kg/m<sup>2</sup> och skift.
- **Tillsats av vatten** är av vikt att kontrollera. Denna kvot kontrolleras i laboratorium med instampningsprover, eller direkt i fält med så kallade isotopmätare (Troxler). Parametern som kontrolleras är antingen vattenhalt, vattenkvot eller luftporhalt. Gränsvärdet är optimal vattenkvot eller en luftporhalt mindre än 5 %. Den sistnämnda är fördelaktig för att främja ett högt tempo vid stabiliseringen, då avläsningen sker direkt i fält. Riktvärdet vid kontroll är optimal vattenhalt/kvot där tolerans typiskt kan vara  $\pm 1$  %. Tolerans för luftporhalt kan inte urskiljas.

- 
- **Infräsningsdjup** kontrolleras genom att avväga det djup som presteras under arbetets gång. Kontroll av infräsningsdjupet görs normalt direkt på maskinen på speciellt mätdon, vid stabiliseringen på E22 Hurva-Rolsberga fanns en mätsticka där djupet direkt kunde avläsas. Gränsvärdet är det konstruktionstekniska djupet på det stabiliserade lagret. Ett typiskt toleransvärde kan vara  $\pm 20$  mm.
  - **Kontroll av ”överlapp”** vid infräsning är inte behandlat som en kontrollparameter i litteraturen, men poängteras starkt av fackmän, som menar att kontrollen bör utföras som ett krav på högsta överlappsytta för en kontrollerad total yta. Överlappet medför för övrigt en större mängd bindemedel än tänkt, varvid inhomogeniteter i hållfasthet uppstår med funktionsproblem som följd.
  - **Packning** kan följas upp mot ett förutbestämt värde på minsta uppnådda packningsgrad (gränsvärde normalt 92-98 % av Standard Proctor packningsgrad). En annan variant är att följa upp packningen med högsta tillåtna uppnådda luftporhalt, något som tillämpas vid stabiliseringen E22 Hurva- Rolsberga (gränsvärde mindre än 5 %). Packningen kan även kontrolleras med yttäckande packningskontroll (YPK). Toleranser kan ej urskiljas.
  - **Efterbehandling** innefattar härdning av det stabiliserade lagret, som förseglas för att förhindra avgående av vatten (avdunstning) för att främja hydratation. Detta har visats ge mindre hydratationssprickor och större sluthållfasthet. Vid härdning med emulsion (membranhärdning) anges ett krav på viss mängd per yta (typiskt 0,5-1,4 liter per kvadratmeter). Efterbehandling ingår normalt inte som kontrollpunkt, utan följs upp med hänsyn till hur länge härdningen ska fortgå innan ytan belastas, normalt gränsvärde 4-5 dagar.
  - **Hållfasthet och hållfasthetsutveckling** av lagret görs efter att produktionen är avslutad. Främst kontrolleras hållfasthetsutveckling och sluthållfasthet. Normalt kontrolleras hållfastheten vid ett, sju och 28 dagar mot riktvärden åstadkomna för provkroppar i laboratorium. Uppföljningen av denna görs vanligen med seismiktester in-situ och med provkroppar från kärnprovtagningar. Vid seismiktester in-situ används samband mellan uppmätt ytvågshastighet och hållfasthet för att kontrollera hållfasthetsutveckling och sluthållfasthet. Provkroppar från kärnprovtagning kontrolleras mot uppnådd tryckhållfasthet (UCS). Gränsvärdet vid hållfasthetsbestämningarna är den dimensionerande hållfastheten, typiskt mellan 2-4 MPa. Toleranser kan inte urskiljas. Viktigt att ta hänsyn till vid hållfasthetsbestämningar är mognadsgraden, som anger den relativa härdningstiden vid en viss referenstemperatur. Denna är viktig att känna till för att på ett rättvist sätt kunna avgöra om hållfastheten är uppnådd eller inte.

- 
- **Temperatur** får aldrig understiga 4-5 °C i skuggan vid stabilisering, för varje godtycklig tidpunkt.
  - **Vindhastigheten** får inte överskrida 25 m/s.

Inga kontroller skiljer sig nämnvärt åt eller saknas i STRABAGs kontrollprogram för stabilisering av delsträckorna på väg E22, jämfört med de framtagna vid litteraturstudien. I grunden kontrolleras samma parametrar, ibland dock med andra metoder än de beskrivna i referenslitteraturen. Dock framgick inte under litteraturundersökningen vikten av att ta hänsyn till hållfasthetens mognadsgradsutveckling med avseende på rådande lufttemperatur, samt att provkropparnas utformning vid tryckhållfasthetstest bör vara två gånger diametern i längd och att diametern ska vara minst fem gånger större än den största partikelstorleken. Som sammanfattning från intervjun med Ulf Ekdahl bör också poängteras att eventuellt överlapp vid spridning av cement kan få inverkan på styvheten på just den sträckan, vilket kan resultera i reflektionssprickor i asfalten.

För att det resultat som eftersträvas ska uppnås är det viktigt att samtliga kontroller fullföljs, annars kan detta resultera i problem såsom reflektionssprickor och låg bärighet som är svårt och dyrt att åtgärda i efterhand. Totalt sett innebär stabiliseringstekniken ett mer komplext byggande än vid konventionell uppbyggd. Utförs kontrollerna på rätt sätt erhålls en väg med högre hållfasthet och ett förmodat mindre underhåll.

---

## 5 Energi- och miljöanalys

*Detta avsnitt behandlar miljö- och energiaspekter för två olika vägkonstruktioner. En stabiliserad och en konventionell överbyggnad jämförs med avseende på energiförbrukning och koldioxidutsläpp vid transport och tillverkning av ingående material.*

### 5.1 Koldioxidutsläpp och energiförbrukning vid vägbyggnad

En betydande andel av det material och den arbetskraft som används under en vägs livscykel åtgår under byggfasen. Byggfasen medför ett behov av specifika material för att åstadkomma en pålitlig konstruktion. Dessa material ska på något sätt utvinnas ur råmaterial för att sedan förädlas. Samtidigt ska dessa material också transporteras till byggplatsen, alltifrån enstaka kilometer till hundratals mil. Detta medför en konsumtion av energi och också ett utsläpp av koldioxid. Att förstå dessa moment är avgörande för att kunna analysera och förbättra miljö- och energipåverkan vid anläggandet av en väg.

Byggfasen är enligt Stripple (2001) en av tre faser i en vägs livscykel, de andra två är drift och underhåll samt rivning/återvinning av konstruktionen. Vid beräkning av koldioxidutsläpp och energiåtgång vid anläggande av vägar, brukar vanligtvis beräkningarna delas upp i följande delar:

- Tillverkning av material
- Transport av material
- Uppförande av väg
- Drift och underhåll

*Byggfasen* innebär ett ingrepp i naturen med bland annat urgrävningar, schakt av massor, grundförstärkning, samt uppbyggnad av väggkroppen med krossmaterial och asfalt. Med avseende på koldioxidutsläpp och energiförbrukning sker den största miljöpåverkan under uppförandet i en vägs livscykel. Uppförandefasen följs av vägens ibrukssättande, där miljöpåverkan sker vid *drift- och underhållsarbete* såsom; vinterunderhåll, reparation av trafikordningar och reparation av vägen m.m. Det är sällan som en väg rivs fullständigt efter dess tekniska livslängd. Istället fortsätter underhållet år efter år och ingående material i vägen byts ut under tiden (Stripple, 2001). Vid cementstabilisering av en väg uppkommer nya typer av koldioxidutsläpp och energiförbrukningar än vid traditionellt byggande, främst från tillverkning av cement. Men även från transport av cementet till arbetsplatsen, där avståndet från cementfabriken ibland kan vara långt. Den huvudsakliga fördelen med stabiliseringstekniken är att väggkroppen blir tunnare och att materialet i väglinjen samt i närområdet kan utnyttjas. Detta minskar behovet av krossmaterial och samtidigt transporter av dessa (Lindh, P, 2010). En stabiliserad konstruktion kräver också i regel mindre mängder asfalt, vilket minskar tillverkningen av asfaltsmassa. Materialet som stabiliseras får i regel också en större hållfasthet och därmed större deformationsmotstånd. Detta bör leda till minskat underhållsbehov under vägens tekniska livslängd.

---

## 5.2 Metod vid beräkningar av koldioxidutsläpp och energiförbrukning

Detta avsnitt behandlar koldioxid- och energiförbrukning vid utförande av stabiliserade vägkonstruktioner i förhållande till konstruktioner utan stabiliserade lager. Det är endast överbyggnaden för dessa vägkonstruktioner som analyseras. Totalt studeras tre konstruktionsalternativ för delsträcka Hurva-Rolsberga utifrån koldioxidutsläpp och energiförbrukning:

1. Rivning av befintlig väg och återuppbyggnad med stabilisering av terrass och bärlager med cement och merit, en cementtillsats av granulerad masugnsslagg.
2. Rivning av befintlig väg och återuppbyggnad med uppbyggda lager utan stabilisering, konventionell konstruktion.
3. Breddning av befintlig väg med 1,5 meter utan stabilisering, konventionell konstruktion.

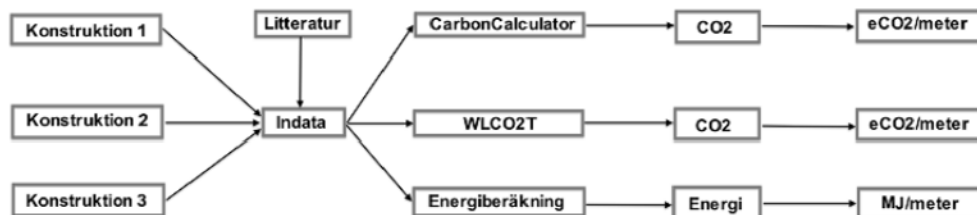
Tidigare examensarbeten visar att nedanstående punkter är av störst vikt i vägbyggnadssammanhang med avseende på energiåtgång och mängd koldioxidutsläpp (Lindén (2008) samt Bilal & Maytham (2010)):

- Transporter av material
- Asfaltstillverkning
- Bitumentillverkning
- Krossning av stenmaterial
- Cement- och meritstillverkning

Utifrån erfarenheter från tidigare examensarbeten tas endast punkterna ovan med i energi- och koldioxidanalyserna. Det som är av intresse är att kunna jämföra konstruktionstyperna miljömässigt mot varandra, och analyserna ämnar alltså inte att ge ett komplett värde på koldioxid- och energiåtgång för vägkonstruktionerna ur separat hänsyn. Analysen av aspekterna givna ovan utförs utifrån avgränsningen *cradle to site*, det vill säga den påverkan som sker vid materialets tillverkning i fabrik tills att det transporterats till byggplatsen. Analyserna av miljöpåverkan på grund av energiförbrukning och koldioxidutsläpp baseras främst på indata från industrin. Detta medför att indata kan påvisa en stor spridning och att det kan vara svårt att få resultat som är exakta. Därför är det av större vikt att utföra jämförande studier av koldioxidutsläpp istället för att försöka beräkna ett totalt värde för en konstruktion, då detta oftast blir missvisande och inkorrekt (Prince & Amiri, 2010).

För att utvärdera de olika konstruktionernas koldioxidutsläpp används två programvaror som är speciellt framtagna för att användas i vägbyggnadssammanhang. Den ena programvaran heter *WLCO2T<sup>TM</sup>* och är framtagen av URS i Nottingham, UK. Detta program kan beräkna livscykelkostnader och totalt koldioxidutsläpp för en väg under hela dess livscykel, dvs. uppförande, drift och underhåll samt avveckling. Det andra programverktyget som testas är *CARBON CALCULATOR* som är framtaget av det brittiska vägverket. I detta program kan

endast koldioxidutsläpp under byggfasen studeras. Programvarorna beskrivs utförligare i senare delar av rapporten. Utparametrarna från bägge programmen utvärderas och sammanställs till en koldioxidpåverkan från den stabiliserade konstruktionen, och jämförs med de två mer konventionella förslagen. Beräkning av energiförbrukning sker för hand, med utgångspunkt från samma moment som analyseras i koldioxidberäkningarna.



Figur 19 - Processchema för beräkning av CO<sub>2</sub> påverkan

På grund av att programvarorna är framtagna i England kan emissionsfaktorerna skilja sig från angivna värden framtagna i svenska undersökningar. En beräkning av emissionsfaktorer för svenska förhållanden utförs därför med värden från Stripples (2001) som grund. Stripples (2001) rapport innefattar en inventering av energi- och materialförbrukning samt emissioner för delmoment vid vägbyggnad, som kan användas som underlag för att utföra livscykelanalyser.

## 5.3 Koldioxidutsläpp vid produktion och transport av material

### 5.3.1 Koldioxidekvivalenter

Växthusgaser innefattar alla gaser som påverkar det globala klimatet och dess uppvärmning. Det finns flera olika växthusgaser, men i Kyoto- protokollet har valts att fokusera på fyra av dessa, på grund av dess större påverkan (Naturvårdsverket, 2012):

- **Koldioxid** (CO<sub>2</sub>), som står för 80 % av utsläppen av växthusgaser i Sverige.
- **Dikväveoxid** (N<sub>2</sub>O) som står för 12 % av utsläpp av växthusgaser i Sverige
- **Metan** (CH<sub>4</sub>) från jordbruk och avfallsdeponier som står för 8 % av totala utsläppen av växthusgaser i Sverige
- **Fluorerande gaser** (såsom ozon) från t.ex. luftkonditioneringar och kylanläggningar, som står för 1 % av det totala utsläppet av växthusgaser i Sverige. Fluorerande gaser ingår inte i beräkningarna i detta examensarbete.

Vid beräkning av en process påverkan på klimatet i form av växthusgaser, brukar detta behandlas utifrån omräkningar av ovanstående gaser till dess ekvivalenta påverkan gentemot koldioxid. Detta kallas för koldioxidekvivalenter och utgår från gaserna koldioxid, metan och dikväveoxid. Gaserna vägs ihop till dess potentiella växthuseffektformåga (GWP). Utifrån detta kan total växthuspotential i ett hundraårsperspektiv beräknas och benämns då GWP100 (Naturvårdsverket, 2012). GWP100 kan beräknas enligt:



---


$$GWP100 = CO_2 + CH_4 \cdot 21 + N_2O \cdot 310 [CO_2e] \quad (\text{Ekv. 20})$$

Där	$CO_2=$	Vikt koldioxid
	$CH_4=$	Vikt metan
	$N_2O=$	Vikt dikväveoxid
	$CO_2e=$	Ekvivalent vikt koldioxid

(Naturvårdsverket, 2012)

### 5.3.2 Källor för koldioxidutsläpp

Vid beräkning av emissionsfaktorer utgås från den diesel, olja, gas och elektricitet som konsumeras vid produktion och transport av samtliga material. Vid beräkningar av koldioxidutsläpp för konsumerad elektricitet används svensk elmix. I programmen Carbon Calculator och WLCO2T används värden på emissioner för brittiska förhållanden (Hammond & Jones, 2008). Det slutliga resultatet från koldioxidanalyserna, i samband med ombyggnation av väg E22 och delsträcka Hurva-Rolsberga, ges i ett procentförhållande gentemot hur mycket varje ombyggnadsförslag släpper ut.

### 5.3.3 Karbonatisering av betong

Ett fenomen som bör tas hänsyn till är en cementbetongs förmåga att binda tillbaka koldioxid under dess livslängd. Detta sker då koldioxid i atmosfären reagerar med kalciumhydroxid i betongen vilket leder till utfällningar av kalciumkarbonat. Processen sänker den starkt basiska omgivningen i betongen till surare förhållanden (Engelsen, Mehus, Pade, & Saether, 2005). I vilken hastighet och i vilka mängder detta upptag sker beror på ett flertal faktorer såsom:

- Koldioxidhalten hos omgivande luft
- Mängd karbonatiserbart material
- Täthet hos betongen
- Fukthalt (Högst karboniseringshastighet vid 50-60% RH)
- Härdningens kvalitet

(Fagerlund, G, 1992)

Teoretiskt kan betong ta upp 0,686 kg koldioxid per kg cement i ett långt tidsperspektiv, det vill säga tusentals år (Stripple, 2001). Dock är andelen av den mängd som tas upp över en 40-årsperiod liten, vilket är ett normalt tidsspann för en vägs tekniska livslängd. Därför är också påverkan liten i ett mindre tidsperspektiv, men i ett längre tas signifikanta mängder koldioxid upp. Krossad förbrukad betong medför ett väsentligt upptag av koldioxid, då nya färskas ytor bildas som snabbt karbonatiserar. En krossad brobetong till exempel, kommer teoretiskt att fullständigt karbonatisera inom tre år om det finns fri tillgång till luft (Lagerblad, B, 2009).

---

## 5.4 Energiförbrukning vid produktion och transport av material

Vid beräkningar av energiåtgång i samband med ombyggnation av väg E22 och delsträcka Hurva-Rolsberga ges resultatet i MJ/m för respektive ombyggnadsförslag. Med hänsyn till att endast produktion och transport för utvalda material beräknas är skillnaderna mellan två beräkningar det som ska redovisas, i form av procentenheter. För att kunna utföra detta krävs uppgifter på energiåtgång som respektive moment kräver. Till exempel behöver ett krossverk både diesel och el för att kunna drivas, total åtgång av både diesel och el räknas då om till antal MJ/ton som krävs för att framställa krossmaterialet. Samma sak gäller vid beräkning av energiåtgång vid produktion av asfaltmassa, bitumen, cement och merit. Vid beräkningar av energiåtgång för transporter av material studeras endast åtgången av drivmedel (diesel) för fordonen och räknas om till MJ/ton och km. Hur samtliga värden på energiåtgång tagits fram beskrivs i avsnitt 5.6.

## 5.5 Ombyggnadsförslag för delsträcka Hurva-Rolsberga

### 5.5.1 Vägkroppens uppbyggnad före ombyggnad

Vägens uppbyggnad före ombyggnad av delsträcka Hurva-Rolsberga varierade längs med sträckningen. Vid förundersökningar har fem stycken indelningar av den gamla vägen gjorts:

0/700– 3/600	2+1 väg, nybyggnad på 1980-talet, ungefärlig bredd 13 meter.
3/600- 4/500	Betongväg byggd på 1950-talet, bredd 7 m. Breddad till 13 m på 1980-talet.
4/500- 4/700	Betongväg byggd på 1950-talet, bredd 7 m. Breddad till 13 m 1990-talet p.g.a. nya ”vänstersvängsfickor” .
4/700- 6/070	Betongväg byggd på 1950-talet, bredd 7 m. Breddad på 1960-talet till 13 m i samband med ombyggnad av trafikplats.
6/070- 6/250	Betongväg byggd på 1950-talet, bredd 7 m. Breddad till 13 m på 1960-talet.

Undersökningarna utgår från startplatsen för ombyggnadsförslaget i sektion 0/700 och slutar i sektion 6/250, totalt längd 5550 m. Utifrån radarundersökning av sektionerna 3/500- 6/250 tolkas vägens tvärsektion enligt nedanstående:

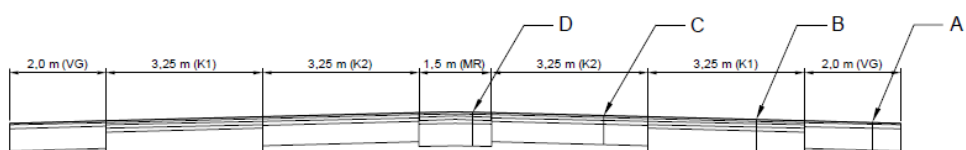
**Tabell 6 - Vägkroppens lagerföljd före ombyggnad.**

Lager	Anm.	Tjocklek (mm)
Beläggning	Utifrån radarundersökningar	150
Betong	Utifrån arkivritningar.	200
Förstärkningslager	Utifrån dåtida normer och arkivritningar.	550
Terrass	-	-

Detta tvärsnitt utgör grunden för beräkning av återvunna material som ingår i miljöanalysen.

### 5.5.2 Ursprungsförslag för ombyggnad; förenklad sektion

Ursprungsförslaget innebar en utbyggnad av väg E22 till 18,5 meter utan stabilisering. Ombyggnaden skulle innefatta dels en breddning av 3900 meter och en nybyggnad av 1050 meter. De resterande 600 meterna av utbyggnadsförslaget var så flerdelat att de inte tas med i beräkningarna i miljöanalysen. Istället utförs beräkningar på två representativa snitt, ett för nybyggnaden och ett för breddningen, och koldioxidutsläpp samt energiförbrukning beräknas i kg per meter väg. Överbyggnaden för förslaget skulle utföras enligt nedanstående figur och tabell.



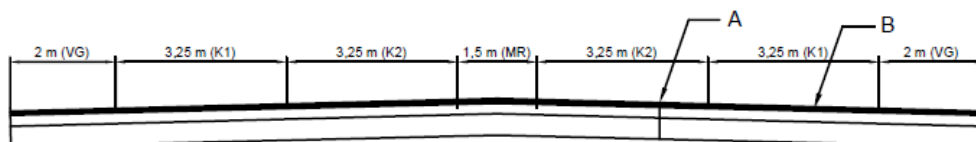
**Figur 20 - Tvärsektion ostabiliserad konstruktion.**

Tabell 7 - Vägkroppens lagerföljd, ursprungligt förslag.

Väggren (A)	Typ	Tjocklek (mm)
Slitlager	ABS 16 50/70	40
Obundet bärlager	Kr. Bergmtrl	80
Förstärkningslager	Kr. Bergmtrl	460
K1 (B)	Typ	Tjocklek (mm)
Slitlager 6,4% bitumen	ABS 16 50/70	40
Bindlager 5% bitumen	Abb 22 50/70	50
Bundet BL 4,4% bitumen	AG22 70/100	70
Obundet BL	Kr. Bergmtrl	80
FL	Kr. Bergmtrl	470
K2 (C)	Typ	Tjocklek (mm)
Slitlager 6,4% bitumen	ABS 16 50/70	40
Bundet BL 4,4% bitumen	AG22 70/100	60
Obundet BL	Kr. Bergmtrl	80
FL	Kr. Bergmtrl	420
Mittremsa (D)	Typ	Tjocklek (mm)
Slitlager 6,4% bitumen	ABS 16 50/70	40
Bindlager 5% bitumen	Abb 22 50/70	50
Bundet BL 4,4% bitumen	AG22 70/100	70
Obundet BL	Kr. Bergmtrl	80
FL	Kr. Bergmtrl	460

### 5.5.3 Aktuellt förslag för nybyggnad

Det förslag som nu är antaget innebär att vägkonstruktionen rivs ned till terrassnivå. För att sedan byggas upp igen inklusive breddning med återvunnet material från den ursprungliga vägkonstruktionen. Terrassen stabiliseras ned till 400 mm, varvid ett bärlager 200 mm tjockt stabiliseras till 250 mm. Bärlagret förseglas och överlagras av ett bundet bärlager, 50 mm tjock. Slutligen läggs ett 40 mm tjockt slitlager.



Figur 21 - Tvärsektion stabiliserad konstruktion.

Tabell 8 - Vägkroppens lagerföljd, aktuellt förslag.

<b>K1 (B)</b>	<b>Typ</b>	<b>Tjocklek (mm)</b>
Slitlager	Viacotop 16 K1	40
Bundet bärlager	ABb16 med Olexobit 45	50
Förseglingsemulsion	Neomex 40C	-
Stabiliserat bärlager (krossmaterial 0-40 mm)	Stabiliserat med 80% cement, 20% merit.	200
Stabiliserad terrass	Stabiliserat med cement	400
<b>K2 (A)</b>	<b>Typ</b>	<b>Tjocklek (mm)</b>
Slitlager	ABS 16 70/100	40
Bundet bärlager	ABb16 med Olexobit 45	50
Förseglingsemulsion	Neomex 40C	-
Stabiliserat bärlager (krossmaterial 0-40 mm)	Stabiliserat med 80% byggcement, 20% merit.	250
Stabiliserad terrass	Stabiliserat med cement	400

## 5.6 Framtagning av energi- och emissionsfaktorer

Detta avsnitt tar upp de emissioner som uppkommer vid tillverkning av krossmaterial, cement, merit och bitumen. Emissionsfaktorer för de olika materialen beräknas utifrån svenska värden (Stripple, 2001). Transportlängder för transporterat material ges och massdisponeringar för de olika förslagen redogörs.

Programvarorna WLCO2T och Carbon Calculator utgår från emissions- och energifaktorer beräknade i en studie från University of Bath "Inventory of Carbon and Energy", ofta förkortad *Bath ICE*, utförd av *Hammond & Jones*. Denna inventering baseras på sekundära källor i den publika sektorn. Inventeringen omfattar 1700 uppgifter om energi- och koldioxidmängder bundna till material i ett livscykelperspektiv. Den mest förekommande undersökta perioden är den som inkluderar all energikonsumtion och koldioxidutsläpp som förekommer till dess att produkten är färdig för att transporteras från fabriken (även kallat *cradle to gate*). Om även transport tas med i beräkningarna kallas detta för *cradle to site*. Beräkningarna i denna modell utgår från bränslemixer och elmixer från den engelska industrisektorn (Hammond & Jones, 2008). För att kunna utföra en jämförelse undersöks faktorer för energi- och koldioxidförbrukning ur ett svenskt perspektiv. För denna studie utgås från värden beräknade av Stripple (2001) i en inventeringsanalys för livscykelanalysberäkningar. En jämförelse av samtliga parametrar vad gäller svenska och brittiska värden följer nedan.

---

## 5.6.1 Produktion av cement

### 5.6.1.1 Emissioner vid tillverkning

Det totala utsläppet av koldioxid vid cementtillverkning har uppskattats till 806 gram per 1000 gram tillverkat cement, varav 686 gram kommer från karbonatisering av kalksten (Stripple, 2001). Vad gäller metan och dikväveoxid står cementproduktionen för obetydliga mängder i förhållande till koldioxidmängden. GWP100 för de tre ämnena blir 806,05 gram per 1000 gram tillverkat cement.

$$GWP100 = 806 + 21 \cdot 0,000164 + 310 \cdot 0,0000546 = 806,05 \text{ g } CO_2e \text{ (Ekv. 21)}$$

Värdena motsvarar både koldioxidtillskottet från själva tillverkningen, men också från den elektricitet som krävs för att producera cementet. Energimässigt kräver tillverkning av cementet 0,39 MJ per kg. Vid tillverkning förbrukas också olja och kol. Energianvändningen från vaggan till färdigproducerat cement för leverans blir 4780 MJ per ton cement (Stripple, 2001). Hammond & Jones (2008) har beräknat energiförbrukningen vid tillverkning av cement till 4600 MJ per ton cement och koldioxidutvecklingen till 830 ton CO<sub>2e</sub> per ton cement från utvinning till färdigproducerat cement klart för leverans.

Tabell 9 – Energiåtgång och koldioxidemissionsfaktorer vid tillverkning av cement.

	Stripple (2001)	Hammond & Jones (2008)
Energiförbrukning	4780 MJ/ton	4600 MJ/ton
Koldioxidutveckling	0,80605 ton CO <sub>2e</sub> /ton cement	0,830 ton CO <sub>2e</sub> /ton cement

### 5.6.1.2 Karbonatisering

På grund av oklarheter över karbonatiseringens omfattning kan inget direkt värde tas fram som kan jämföras med andra moment. Dock kan teoretiskt 686 gram koldioxid per 1000 gram cement bindas tillbaka över en lång tidsperiod. Detta motsvarar 85 % av den utsläppta mängden koldioxid vid tillverkning. Karbonatisering har inte tagits hänsyn till i koldioxidanalyserna, dock görs en teoretisk jämförelse i avsnitt 5.7.6, där all koldioxid antas återbindas.

### 5.6.2 Produktion av Merit

För merit saknas grundliga analyser om hur dess tillverkning påverkar miljön. Merit tillhör dock kategorin granulerad masugnsslagg (Eng. *Granulated Blast Furnace Slag, GGBS*). Data för denna typ av tillsatsmedel har inte beräknats i Stripple (2001). Dock finns denna beräkning i Hammond & Jones (2008). Här beräknas en masugnsslagg kräva 1333 MJ per ton i energi och släppa ut 0,07 ton koldioxidkvivalenter per ton producerat masugnsslagg. Ingen likvärdig svensk undersökning kunde finnas. Istället används värden från Hammond & Jones (2008).

Tabell 10 - Energiåtgång och koldioxidemissionsfaktorer vid tillverkning av merit.

	Hammond & Jones (2008)
<b>Energiförbrukning</b>	1333 MJ/ton
<b>Koldioxidutveckling</b>	0,07 ton CO <sub>2e</sub> / ton GGBS

### 5.6.3 Produktion av bitumen

Emissioner från produktion av bitumen har beräknats av Stripple (2001). Beräkningen utgår från olja som utvinns i Venezuela och transporteras till Nynäshamn, där oljan raffinerar till bitumen. Sedan transporteras bitumen till beställarens depå. Total energiförbrukning för bitumenproduktionen beräknas utifrån dieselmängder och elektricitet som krävs vid produktion och transport till lager. Totalt krävs 3635 MJ per ton producerad bitumen.

Koldioxidutvecklingen beräknas till 173 kg koldioxid per 1000 kg producerad bitumen. Motsvarande siffror för emissioner av dikväveoxid och metan är 0,00011 kg och 0,000035 kg per 1000 kg producerad bitumen (Stripple, 2001). Detta ger inte någon större påverkan på GWP100.

$$GWP100 = 173 + 21 \cdot 0,00011 + 310 \cdot 0,000035 = 173,01 \text{ g CO}_2e \quad (\text{Ekv. 22})$$

Hammond & Jones (2008) beräknar att bitumen kräver 9600 MJ per ton producerad bitumen, ett värde som vida överstiger det beskrivet i Stripple (2001). Dock nämns det i Hammond & Jones (2008) att värdena för energimängden är dåliga och spridda. Koldioxidutsläppet nämns här vara 480 kg koldioxid per 1000 kg producerad bitumen.

Tabell 11 – Energiåtgång och koldioxidemissionsfaktorer vid tillverkning av bitumen.

	Stripple (2001)	Hammond & Jones (2008)
<b>Energiförbrukning</b>	3635 MJ/ton	9600 MJ/ton
<b>Koldioxidutveckling</b>	0,173 ton CO <sub>2e</sub> /ton bitumen	0,480 ton CO <sub>2e</sub> /ton bitumen

#### 5.6.4 Produktion av asfaltmassa exkl. bitumen

Enligt Hammond & Jones (2008) kräver asfalttillverkning en energimängd på 690 MJ per ton asfalt och släpper ut 45 kg koldioxid per 1000 kg producerad asfaltmassa, från utvinning till färdigt material för leverans. Stripple (2001) har uppskattat energiförbrukningen vid asfalttillverkning samt koldioxidutsläpp till 630 MJ och 13 kg koldioxid per 1000 kg producerad asfaltmassa.

Tabell 12 - Energiåtgång och koldioxidemissionsfaktorer vid tillverkning av asfaltmassa exkl. bitumen.

	Stripple (2008)	Hammond & Jones (2008)
<b>Energiförbrukning</b>	630 MJ/ton	690 MJ/ton
<b>Koldioxidutveckling</b>	0,013 ton CO <sub>2</sub> /ton asfaltmassa	0,045 ton CO <sub>2e</sub> /ton asfaltmassa

#### 5.6.5 Produktion av krossmaterial

Krossning av stenmaterial utförs i speciella krossverk i vägbyggets närområde. Vid produktion krävs enligt Stripple (2001) 21,19 MJ energi i form av elektricitet samt 16,99 MJ energi i form av diesel per ton krossat material. I ett livscykelperspektiv krävs totalt 66 MJ energi per ton krossat material. Det totala koldioxidutsläppet som anges i Stripple (2001) är 1,42 kg per 1000 kg krossat material. Vid kontakt med ett lokalt krossverk i närheten av vägbygget E22 Hurva-Rolsberga anges värden som bekräftar det som Stripple (2001) anger.

$$GWP_{100} = 1420 + 21 \cdot 0,00382 + 310 \cdot 0,0361 = 1431 \text{ g CO}_2e \text{ (Ekv. 23)}$$

Hammond & Jones (2008) har beräknat energiförbrukningen vid utvinning av aggregat till 100 MJ per ton material och ett koldioxidutsläpp av 5 kg per 1000 kg material.

Tabell 13 - Energiåtgång och koldioxidemissionsfaktorer vid tillverkning av krossmaterial.

	Stripple (2001)	Hammond & Jones (2008)
<b>Energiförbrukning</b>	66 MJ/ton	100 MJ/ton
<b>Koldioxidutveckling</b>	0,001431 ton CO <sub>2e</sub> / ton krossmaterial	0,005 ton CO <sub>2e</sub> / ton krossmaterial



### 5.6.6 Transport med Lastbil

Stripple (2001) nämner emissioner från transporter av lastbilsfordon. En lastbil med maximal lastbilskapacitet på 32 ton antas dra i snitt 0,34 liter diesel per km om lastbilen är fullastad enkel resa och körs tom tillbaka. Den totala energiförbrukningen anges till 14,7 MJ per km. Koldioxidutveckling som sker är 1050 gram per km (Stripple, 2001). Motsvarande mängder dikväveoxid och metan är 0,0213 och 0,000667 gram per km.

$$GWP100 = 1050 + 21 \cdot 0,000667 + 310 \cdot 0,0213 = 1056,6 \text{ gram } CO_2e \text{ (Ekv. 24)}$$

Tabell 14 - Energiförbrukning och koldioxidutsläpp för transporter med lastbil

Energiförbrukning och koldioxidutsläpp för transport med lastbil (lastkapacitet 32 ton) (Stripple, 2001)	
Total energiförbrukning	14,7 MJ/km
Koldioxidutveckling	1050 g CO <sub>2</sub> /km
Ekv. Koldioxidutveckling	1056,6 g CO <sub>2e</sub> /km

### 5.6.7 Transport med färja

Vid transport med färja brukar emissioner och energiförbrukning anges per ton fraktat material och kilometer. Den energiförbrukning som krävs för transport på grund av förbrukat bränsle motsvarar 0,143 MJ per ton och kilometer. Koldioxidutsläppet är 10 gram per ton och kilometer. Inga värden på dikväveoxid och metan är registrerade Stripple (2001).

Tabell 15 - Energiförbrukning och koldioxidutsläpp för transporter med färja

Energiförbrukning och koldioxidutsläpp för transport med färja (Stripple, 2001)	
Total energiförbrukning	0,143 MJ/ton och kilometer
Koldioxidutveckling	10 gram CO <sub>2</sub> /ton och kilometer
Ekv. Koldioxidutveckling	-

### 5.6.8 Beräkning av massor

Beräkning av massor sker genom att ur tvärsektioner för de två förslagen givna i avsnitt 5.5.2 och 5.5.3, beräkna teoretiska volymer för ingående lager i överbyggnaden. Indelningar för massberäkningen har gjorts med hänsyn till körfält, mittremsa och väggren. Varje delbredd har multiplicerats med lagertjocklek och volymer har beräknats för väglängd 1 meter. För den fullständiga beräkningen se Bilaga A.

### 5.6.8.1 Ombyggnadsförslag 1

Tabell 16 - Resultat av massberäkningar, stabiliserad vägkonstruktion,

Lager	Typ	Volym (m <sup>3</sup> )	Vikt (ton)
Slitlager	ABS 11 70/100	0,42	0,714
Slitlager	Viacotop 11	0,2275	0,386
Bindlager	Abb16 med PMB50	0,725	1,23
Bundet bärlager	AG22 100/160	0,2	0,34
Obundet bärlager	Krossat material	3,7	7,4
Cement	-	-	0,673
Merit	-	-	0,066

### 5.6.8.2 Ombyggnadsförslag 2

Tabell 17 – Resultat av massberäkningar; konventionell vägkonstruktion, full ombyggnad.

Lager	Typ	Volym (m <sup>3</sup> )	Vikt (ton)
Slitlager	ABS 16 50/70	0,7	1,19
Slitlager	Abb 22 50/70	0,4	0,68
Bundet bärlager	AG22 70/100	0,95	1,615
Obundet bärlager	Krossat material	1,4	2,8
Förstärkningslager	Krossat material	7,79	15,58

### 5.6.8.3 Ombyggnadsförslag 3

Tabell 18 - Resultat av massberäkningar; konventionell vägkonstruktion, breddning.

Lager	Typ	Volym (m <sup>3</sup> )	Vikt (ton)
Slitlager	ABS 16 50/70	0,7	1,19
Slitlager	Abb 22 50/70	0,4	0,68
Bundet bärlager	AG22 70/100	0,285	0,4845
Obundet bärlager	Krossat material	0,42	0,84
Förstärkningslager	Krossat material	2,337	4,674

---

## 5.7 Beräkningar av koldioxidutsläpp med Carbon Calculator

### 5.7.1 Carbon Calculator

Highways Agency i England har tagit fram programmet ”Carbon Calculator” för beräkning av koldioxidavtryck som uppkommer i samband med vägbyggnad. I programmet finns emissionsfaktorer inlagda för en mängd olika material. Endast vikt på material och transportlängder behöver tas fram för att utföra en beräkning. Det ska dock poängteras att utsläppsvärdena är framtagna för England, varvid en jämförelse mellan emissionsfaktorerna i programmet och värden för svenska förhållanden bör utföras. Om något material saknas går det att lägga till, men då måste egna värden för koldioxidutsläpp tas fram. Med denna funktion kan även beräkningar med svenska utsläppsvärden utföras.

Programmet klarar av att beräkna koldioxidavtrycket för hela processen från byggstart till färdig väg. Dock finns det en del begränsningar i programmet, till exempel vid beräkningar av transport av material går det endast att välja ett av transportmedlen; tåg, lastbil eller båt. Det går heller inte att dela upp sträckor och längden måste sättas till ett konstant värde för ett specifikt transportmedel.

Programmet är uppdelat i följande delar:

- Krossmaterial
- Trä
- Betong, Bruk & Cement
- Metaller
- Plast
- Glas
- Övrigt
- Ytbehandling
- Arbetsplatsutrustning
- Transport av avfall
- Arbetsbodar
- Material transporter
- Persontransporter

Emissionsfaktorer som används i programmet utgår från en inventering gjord av Hammond & Jones (2008). Slutresultatet ges som ”Total carbon footprint”, vilket är antal ton koldioxid som släpps ut vid uppförandet av vägen.

---

## 5.7.2 Beräkning av koldioxidavtryck

Beräkningar utförs enligt beskrivningar i avsnitt 5.2. Totalt studeras 3 olika ombyggnadsförslag, först med emissionsfaktorer från Hammond & Jones (2008) i avsnittet nedan och sedan med emissionsfaktorer från Stripple (2001) i avsnitt 5.7.4.

## 5.7.3 Beräkning med emissionsfaktorer från Hammond & Jones, (2008)

### 5.7.3.1 Ombyggnadsförslag 1 - Stabilisering

#### Massberäkningar (bilaga A)

Vid byggnation med stabiliserad väggkropp används befintligt material från den ursprungliga väglinjen, som består av 15 cm asfalt och 15 cm armerad betong. Materialet schaktas upp och körs till ett krossverk. Innan det krossade materialet åter läggs ut, stabiliseras terrassen till ett djup av 40 cm med hjälp av cement. När det krossade materialet åter lagts ut (som bildar bärlagret) görs ytterligare en stabilisering på 20 cm. Totalt används 7400 kg återvunnet krossmaterial per meter väg.

#### Cement och merit (bilaga A)

22 kg/m<sup>2</sup> cement läggs ut vid stabilisering av terrassen, vilket medför 407 kg cement per meter väg. 18 kg/m<sup>2</sup> cement/meritblandning läggs ut vid stabilisering av bärlagret, vilket medför 333 kg per meter väg.

#### Transportlängder

Vid krossning av befintligt material används ett mobilt krossverk, sträckan till krossverket sätts till 6 km i medeltal. Cementet transporteras från Slite på Gotland, och avståndet till arbetsplatsen approximeras till 440 km (i programmet antas hela transportsträckan ske med lastbil). Sträckan från asfaltsverk till utläggningsplats sätts till 17 km i medeltal från Södra Sandby.

#### Bindlager och asfaltslager

Ovanför det stabiliserade bärlagret läggs ett bindlager av asfaltsbetong ABb16 med olexobit 45 och med en total tjocklek på 50 mm. Enligt VV Publ 2005:112, anges ett kalkylvärde för detta bindlager på 5,4 viktprocent bitumen. I programmet Carbon Calculator kan endast heltal matas in och bitumenhalten sätts till 5 %. Ovanpå bindlagret läggs slutligen slitlagret, vilket i detta fall är olika för körfält 1 och 2. I körfält 1 läggs Viacotop16 och i körfält 2 läggs ABS 16 70/100, total tjocklek är 40 mm. Enligt VV Publ 2005:112, har ABS 16 70/100 en bindemedelshalt på 6,3 viktprocent. I programmet CarbonCalculator sätts bitumenhalten till 6 %.

**Tabell 19 - Indata och resultat vid beräkningar av koldioxidutsläpp för stabiliserad vägkropp (alt. 1) med värden från Hammond & Jones, (2008) i Carbon Calculator.**

Material	Densitet (ton/m <sup>3</sup> )	eCO <sub>2</sub> /ton	Massa (kg)	Avstånd mellan tillverknings och utläggningsplats (km)	Typ av transport	Utsläpp CO <sub>2</sub> (Kg)
Återvunnet krossmaterial	2,0	0,005	7400	6	lastbil	41,7
Asfalt 5 % bitumen	1,7	0,071	1575	17	lastbil	114,7
Asfalt 6 % bitumen	1,7	0,076	1100	17	lastbil	85,6
Cement CEM11/A-L	1,5	0,88	407	440	lastbil	377,3
Cement/Merit 80/20 %	1,5	0,73	333	400	lastbil	260,6
<b>Summa</b>						<b>880</b>

### 5.7.3.2 Ombyggnadsförslag 2 - Konventionell

Vid beräkningar i Carbon Calculator antas den befintliga vägen rivas helt ned till terrass och sedan byggas upp som en ostabiliserad vägkropp enligt tabell 7.

#### Massberäkningar (bilaga A)

Totalt används 18,38 ton krossmaterial per meter väg.

#### Transportlängder

Avståndet från stenbrottet till arbetsplatsen sätts till 22 km, från Dalby stenbrott. Sträckan från asfaltsverket till utläggningsplats sätts till 17 km, från Södra Sandby.

#### Bindlager och asfaltslager

Det bundna bärlager (AG22 70/100) beräknas en vikt på 1,615 ton per meter väg och har en bitumenmedelsmängd på 4,4 %, vilket sätts till 4 % i programmet. Bindlagret (Abb 22 50/70) beräknas en vikt på 0,68 ton per meter väg och en bitumenmedelsmängd på 5 %. Slitlagret (ABS 16 50/70) beräknas en vikt på 1,19 ton per meter väg och en bitumenmängd 6,4 %, som sätts till 6 % i programmet. Alla beräkningar av bindlager- och asfaltsmassor finns i bilaga A.

**Tabell 20 - Indata och resultat vid beräkningar av koldioxidutsläpp för konventionell väggropp (alt. 2) med värden från Hammond & Jones, (2008) i Carbon Calculator.**

Material	Denistet	eCO <sub>2</sub> /ton	Massa (kg)	Avstånd mellan tillverknings och utläggningsplats (km)	Typ av transport	Utsläpp CO <sub>2</sub> (Kg)
Krossmaterial	2,0 ton/m <sup>3</sup>	0,005	18380	22	lastbil	135,1
Asfalt 4 % bitumen	1,7 ton/m <sup>3</sup>	0,071	1615	17	lastbil	109,5
Asfalt 5 % bitumen	1,7 ton/m <sup>3</sup>	0,076	680	17	lastbil	49,5
Asfalt 6 % bitumen	1,7 ton/m <sup>3</sup>	0,076	1190	17	lastbil	92,6
<b>Summa</b>						<b>387</b>

### 5.7.3.3 Ombyggnadsförslag 3 – Konventionell breddning

Vid breddning av vägen med traditionell uppbyggnad (enligt tabell 7) kommer delar av den befintliga vägen att behållas. För att utföra en approximativ bedömning vid beräkningar i Carbon Calculator, antas ett representativt tvärsnitt för hela sträckan, se figur 23. I beräkningarna antas 30 % av vägens tänkta bredd omfattas ombyggnationen.

#### Massberäkningar (bilaga A)

Totalt används 5,514 ton krossmaterial per meter väg.

#### Transportlängder

Avståndet från stenbrottet till arbetsplatsen sätts till 22 km från Dalby stenbrott. Sträckan från asfaltsverk till utläggningsplats sätts till 17 km från Södra Sandby.

#### Bindlager och asfaltslager

Det bundna bärlagret (AG22 70/100) beräknas en vikt på 485 kg per meter väg och en bitumenmedelsmängd på 4,4 %, vilken sätts till 4% i programmet. Bindlagret (Abb 22 50/70) beräknas en vikt på 204 kg per meter och en bitumenmedelsmängd på 5 %. Slitlagrets (ABS 16 50/70) beräknas en vikt på 1190 kg per meter väg och en bitumenmängd 6,4 %, som sätts till 6 % i programmet. Slitlagret läggs ut över hela vägytan. Alla beräkningar av bindlager- och asfaltsmassor finns i bilaga A.

Tabell 21 - Indata och resultat vid beräkningar av koldioxidutsläpp för breddning med konventionell utbyggnad (alt. 3) med värden från Hammond & Jones, (2008) i Carbon Calculator.

Material	Denistet	eCO <sub>2</sub> /ton	Massa (kg)	Avstånd mellan tillverknings och utläggningsplats (km)	Typ av transport	Utsläpp CO <sub>2</sub> (Kg)
Krossmaterial	2,0 ton/m <sup>3</sup>	0,005	5514	22	lastbil	40,5
Asfalt 4 % bitumen	1,7 ton/m <sup>3</sup>	0,071	485	17	lastbil	32,9
Asfalt 5 % bitumen	1,7 ton/m <sup>3</sup>	0,076	204	17	lastbil	14,9
Asfalt 6 % bitumen	1,7 ton/m <sup>3</sup>	0,076	1190	17	lastbil	92,6
<b>Summa</b>						<b>181</b>

#### 5.7.4 Beräkning med emissionsfaktorer från Stripple, (2001)

Massberäkningar och materialåtgång är samma som för beräkningen ovan med värden från Hammond & Jones (2008). Emissionsfaktorerna är framtagna i avsnitt 5.6.

##### 5.7.4.1 Ombyggnadsförslag 1 - Stabilisering

Tabell 22 - Indata och resultat vid beräkningar av koldioxidutsläpp för stabiliserad vägröpp (alt. 1) med värden från Stripple, (2001) i Carbon Calculator.

Material	eCO <sub>2</sub> /ton	Massa (kg)	Avstånd mellan tillverknings och utläggningsplats (km)	Typ av transport	Utsläpp CO <sub>2</sub> (Kg)
Cement	0,806	673,4	440	lastbil	574,4
Merit	0,07	66,6	400	lastbil	7,5
Bitumen	0,173	128	17	lastbil	22,4
Asfalt	0,013	2333	17	lastbil	34,6
Krossmaterial	0,0014	9605	6	lastbil	19,9
<b>Summa</b>					<b>659</b>

### 5.7.4.2 Ombyggnadsförslag 2 - Konventionell

Tabell 23 - Indata och resultat vid beräkningar av koldioxidutsläpp för konventionell väggropp (alt. 2) med värden från Stripple, (2001) i Carbon Calculator.

Material	eCO <sub>2</sub> /ton	Massa (kg)	Avstånd mellan tillverknings och utläggningsplats (km)	Typ av transport	Utsläpp CO <sub>2</sub> (Kg)
Bitumen	0,173	170	17	lastbil	29,7
Asfalt	0,013	3485	17	lastbil	51,6
Krossmaterial	0,0014	18380	22	lastbil	69,5
<b>Summa</b>					<b>151</b>

### 5.7.4.3 Ombyggnadsförslag 3 – Konventionell breddning

Tabell 24 - Indata och resultat vid beräkningar av koldioxidutsläpp för breddning med konventionell utbyggnad (alt. 3) med värden från Stripple, (2001) i Carbon Calculator.

Material	eCO <sub>2</sub> /ton	Massa (kg)	Avstånd mellan tillverknings och utläggningsplats (km)	Typ av transport	Utsläpp CO <sub>2</sub> (Kg)
Bitumen	0,173	124,8	17	lastbil	21,8
Asfalt	0,013	2345,5	17	lastbil	34,7
Krossmaterial	0,0014	5514	22	lastbil	20,8
<b>Summa</b>					<b>77</b>



### 5.7.5 Karbonatisering av betong

Teoretiskt kan totalt 686 gram koldioxid återbindas per 1000 g betong genom karboniseringsprocessen. Totalt sprids 36,4 kg cement per kvadratmeter och vägbredden är 18,5 meter. För delsträcka Hurva-Rolsberga, och ombyggnadsförslag 1 med stabilisering, kan totalt 462 kg koldioxid per m väg återbindas.

$$0.686 \text{ kg } CO_2 \cdot 18,5 \text{ m} \cdot 36,4 \text{ kg cement} \approx 462 \text{ kg } CO_2 \quad (\text{Ekv. 25})$$

Karboniseringsprocessen sker under längre tid som överskrider vägens livslängd. Processen kräver även fri syretillgång. Därför inkluderas inte detta i sammanställningen av resultatet.

### 5.7.6 Sammanställning av resultat från beräkningar i Carbon Calculator

Nedan följer resultatet från beräkningar i Carbon Calculator för de tre olika ombyggnadsalternativen.

Tabell 25 - Koldioxidutsläpp i förhållande till ombyggnadsförslag 1. Beräkningarna är utförda med programmet Carbon Calculator (ingen hänsyn har tagits till karbonatisering).

Alternativ	Hammond & Jones (2008) eCO <sub>2</sub> (kg per m väg)	Stripple (2001) eCO <sub>2</sub> (kg per m väg)
1 (Stabilisering)	100 %	100 %
2 (Konventionell)	44 %	23 %
3 (Breddning)	21 %	12 %

### 5.7.7 Relationsexempel till resultat

För att sätta utsläppsvärden i ett sammanhang görs en jämförelse med hur mycket koldioxid som trafiken på vägen släpper ut. Totalt trafikeras delsträcka Hurva-Rolsberg av en årsdygnstrafik på 16 600 fordon/dygn och sträckan är 5,5 km (Trafikverket-f, 2012). Följande antaganden görs vid beräkning:

- En personbil släpper i genomsnitt ut 0,144 kg CO<sub>2</sub>/km (Trafikverket, 2010).
- Ett tungt fordon antas släppa ut 1,057 kg CO<sub>2</sub>/km (Stripple, 2001)
- Andel tung trafik på delsträckan sätts till 5 %

Nedan görs en beräkning på hur många dygn som koldioxidutsläppsskillnaden mellan ombyggnadsförslag 1 och 2 utgör, med svenska värden från Stripple (2001), i förhållande till utsläppen från trafiken:

$$\text{Antal dygn} = \frac{(659-151) \cdot 5500}{16600 \cdot 5,5(0,95 \cdot 0,144 + 0,05 \cdot 1,057)} \approx 162 \text{ dygn} \quad (\text{Ekv. 26})$$

Skillnaden i koldioxidutsläpp för studerade moment mellan ombyggnadsalternativ 1 och 2 motsvarar ungefär 162 dygns trafik på delsträckan.

---

## 5.8 Beräkningar av koldioxidutsläpp med WLCO2T

### 5.8.1 WLCO2T

URS i England har tagit fram programmet WLCO2T, som beräknar livscykelkostnad och koldioxidutsläpp för ombyggnad av vägar. Programmet är framtaget för att kunna optimera olika ombyggnadsalternativ kostnadsmässigt och samtidigt ta hänsyn till koldioxidutsläppet som sker vid ombyggnaden.

I programmet kan följande punkter beräknas för olika ombyggnadsalternativ:

- Kostnad för uppförande
- Kostnad för drift- och underhåll
- Livscykelkostnad
- Koldioxidutsläpp vid uppförande
- Koldioxidutsläpp vid drift- och underhåll
- Totalt koldioxidutsläpp under vägens livscykel

Samtliga emissionsparametrar i programmet är framtagna av Hammond & Jones (2008), för att användas i England och är inte direkt överförbara för svenska förhållanden. URS arbetar dock globalt och utför beräkningar åt andra länder, men då måste koldioxidutsläppsfaktorer tas fram. Programmet tillhör URS och finns inte att tillgå för allmänt bruk.

### 5.8.2 Beräkning med emissionsfaktorer från Stripple, (2001)

Beräkningarna med WLCO2T har utförts av en av upphovsmakarna till programmet som arbetar på URS i London. För att beräkningarna skulle kunna utföras skickades information om de 3 olika ombyggnadsförslagen, massberäkningar enligt bilaga A och sektionsritningar enligt figur 20 och 21. Emissionsfaktorer från Stripple (2001) bifogades också.

### 5.8.3 Sammanställning av resultat från beräkningar i WLCO2T

Eftersom programmet innehas av URS får vi endast tillgång till resultatet, som i tabellen nedan redovisas i procentförhållande mellan de olika ombyggnadsalternativen. Vid jämförelse är procentförhållandena likvärdigt överrens med beräkningarna utförda i Carbon Calculator.

**Tabell 26 - Koldioxidutsläpp i förhållande till ombyggnadsförslag 1. Beräkningarna är utförda med programmet WLCO2T och med emissionsfaktorer från Stripple, (2001) (ingen hänsyn har tagits till karbonatisering).**

Alternativ	WLCO2T Stripple (2001)
1 (Stabilisering)	100 %
2 (Konventionell)	22 %
3 (Breddning)	10 %

---

## 5.9 Beräkningar av energiåtgång

Energiförbrukningen för valda moment beräknas utifrån massdispositionen i bilaga A och de transportavstånd som angivits (5.7.3.1-5.7.3.2). För produktion av material anges ett värde på förbrukad energimängd per viktenhet producerat material. För transport förbrukas energi beroende på mängd material, val av transportmedel och transportsträcka. Endast produktion och transport av nämnda parametrar i avsnitt 5.2 analyseras för de 3 ombyggnadsförslagen som beskrivs i avsnitt 5.2. Energiförbrukningsfaktorer som används kommer från Hammond & Jones (2008) och Stripple (2001). Den fullständiga energiberäkningen görs i Excel och finns i bilaga B.

### 5.9.1 Indata vid beräkningar

Tabell 27- Energiåtgång för produktion och transport av material.

Moment	Stripple (2001)	Hammond & Jones (2008)
Produktion av cement	4780 MJ/ton	4600 MJ/ton
Produktion av merit	Ej angivet	1330 MJ/ton
Produktion av asfaltsmassa	630 MJ/ton	690 MJ/ton
Produktion av bitumen	3635 MJ/ton	9600 MJ/ton
Produktion av krossmaterial	66 MJ/ton	100 MJ/ton
Transport av material med lastbil	14,7 MJ/km	Ej angivet
Transport av material med färja	0,143 MJ/ton och km	Ej angivet

### 5.9.2 Beräkning av energiåtgång

Två beräkningar sker med antingen indata från Hammond & Jones (2008) eller från Stripple (2001). Som regel är energifaktorerna högre från Hammond & Jones i samtliga fall. Mest signifikant skiljer sig påverkan från produktion av merit, asfaltsmassa och bitumen.

Energiberäkningarna finns i bilaga B.

### 5.9.3 Sammanställning av resultat

Utifrån beräkningar kan urskiljas att värden givna från olika källor ger olika resultat. Vad detta beror på behandlas i diskussionsdelen. Den största skillnaden är energiförbrukning vid bitumenproduktion och vid asfaltstillverkning. Av hänsyn till att endast ett begränsat antal moment vid vägbyggnad har beräknats är det i första hand den procentuella skillnaden mellan ombyggnadsförslagen som är av intresse.

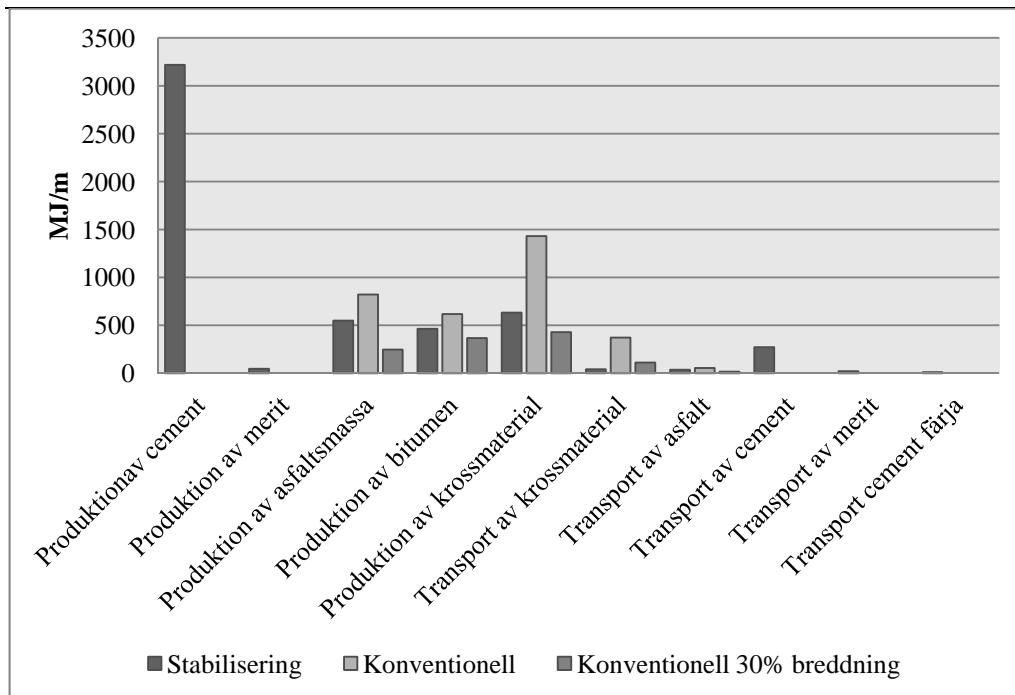
### 5.9.3.1 Resultat från beräkning med energiförbrukningsfaktorer från Stripple, (2001)

Det sammanställda resultatet från energiberäkningen ges nedan, med indata tagna från Stripple (2001). Samtliga poster redovisas i procentandelar och jämförs med andra moment för samma konstruktion. Längst ned i tabellen anges inom parentes energiandelen som motsvaras för den stabiliserade konstruktionen. Ett sammanfattande diagram illustrerar skillnaderna mellan konstruktionerna för de olika ombyggnadsförslagen, utifrån de moment som beräknats.

Tabell 28 - Skillnad i energiåtgång mellan de 3 ombyggnadsförslagen, med energiförbrukningsfaktorer från Stripple (2001).

Moment	1. Stabilisering (MJ/m)	2. Konventionell (MJ/m)	3. Konventionell 30% breddning (MJ/m)
Produktion av cement	52,7%	-	-
Produktion av merit	1,5 %	-	-
Produktion av asfaltmassa	24 %	49,3 %	57,6 %
Produktion av bitumen	7,6 %	13,9 %	17,9 %
Produktion av krossmaterial	8 %	27,2 %	17,7 %
Transport av krossmaterial	0,7 %	8,4 %	5,4 %
Transport av asfalt	0,6 %	1,2 %	1,4 %
Transport av cement	4,4 %	-	-
Transport av merit	0,3 %	-	-
Transport av cement färja	0,2 %	-	-
Summa	<b>100% (100%*)</b>	<b>100% (73%*)</b>	<b>100% (34 %*)</b>

\*Procentandel av stabiliserad konstruktion



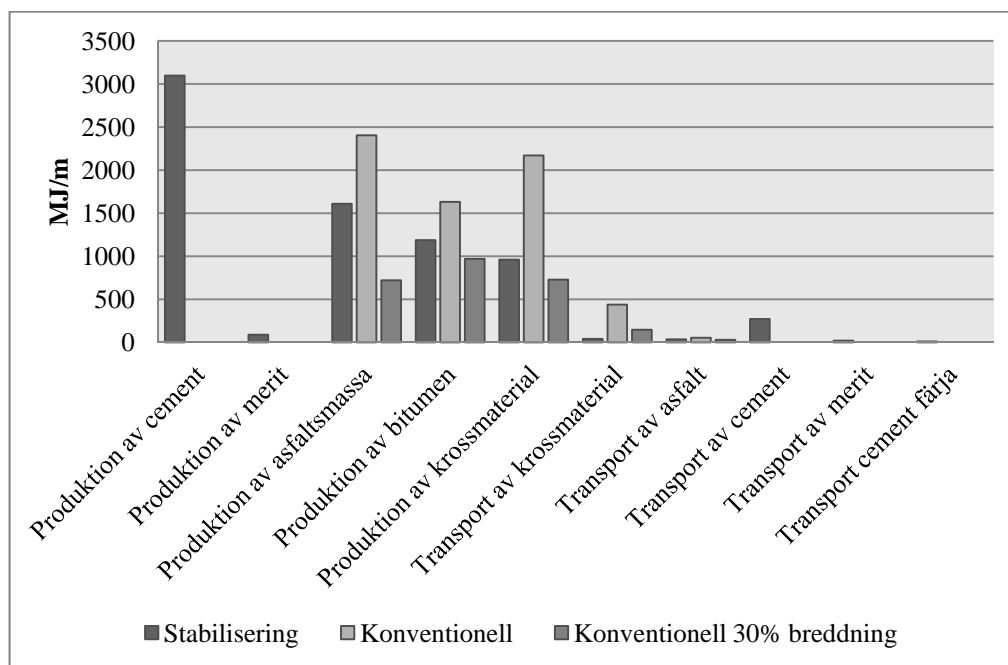
### 5.9.3.2 Resultat från beräkning med energiförbrukningsfaktorer från Hammond & Jones, (2008)

Det sammanställda resultatet från energiberäkningen ges nedan, med indata tagna från Hammond & Jones (2008). Samtliga poster redovisas i procentandelar och jämförs med andra moment för samma konstruktion. Längst ned i tabellen anges inom parentes energiandelen som motsvaras för den stabiliserade konstruktionen. Ett sammanfattande diagram illustrerar skillnaderna mellan konstruktionerna för de olika ombyggnadsförslagen, utifrån de moment som beräknats. Det står klart att denna beräkning ger en mindre differens mellan den stabiliserade konstruktionen och den konventionella.

Tabell 29 – Skillnad i energiåtgång mellan de 3 olika ombyggnadsförslagen, med energiförbrukningsfaktorer från Hammond & Jones (2008).

Moment	1. Stabilisering (MJ/m)	2. Konventionell (MJ/m)	3. Konventionell 30% breddning (MJ/m)
Produktion av cement	43,6 %	-	-
Produktion av merit	1,3%	-	-
Produktion av asfaltmassa	22,7 %	38,1%	43,8%
Produktion av bitumen	16,7 %	25,9%	32,8%
Produktion av krossmaterial	10,4 %	29,2%	18,6 %
Transport av krossmaterial	0,5 %	5,9 %	3,8%
Transport av asfalt	0,5 %	0,9%	1%
Transport av cement	3,8 %	-	-
Transport av merit	0,3 %	-	-
Transport cement färja	0,2 %	-	-
<b>Summa</b>	<b>100% (100%*)</b>	<b>100% (89%*)</b>	<b>100% (47%*)</b>

\*Procentandel av stabiliserad konstruktion



## 5.10 Sammanfattning av resultat från miljö- och energianalyserna

Nedan redovisas en sammanfattande tabell över resultatet från koldioxidberäkningarna och energiberäkningarna, med indata från Stripple (2001) och Hammond & Jones (2008). Resultatet anges i procentdelar gentemot den stabiliserade konstruktionen.

Tabell 30 – Sammanfattning av resultat från miljö- och energianalyserna

	Energimängd (MJ/m)	Koldioxidmängd (kg CO <sub>2</sub> e/m)
<b>Beräknat med värden från Hammond &amp; Jones (2008)</b>		
1. Stabiliserad konstruktion	100 %	100 %
2. Konventionell konstruktion	89 %	44 %
3. Konventionell konstruktion, 30% breddning	47 %	21 %
<b>Beräknat med värden från Stripple (2001)</b>		
1. Stabiliserad konstruktion	100 %	100 %
2. Konventionell konstruktion	73 %	23 %
3. Konventionell konstruktion, 30% breddning	34 %	12 %
<b>Beräknat med WLCO<sub>2</sub>T, värden från Stripple (2001)</b>		
1. Stabiliserad konstruktion	-	100 %
2. Konventionell konstruktion	-	22 %
3. Konventionell konstruktion, 30% breddning	-	10%

---

## 6. Diskussion

### 6.1 Säkerställande av kvalitet och bärighet

Arbetet för att analysera de kontrollmetoder som är lämpliga för det stabiliserade lagret har gjorts genom att gå igenom referenslitteratur, och jämföra detta med kontrollmetoder valda på ett vägbygge i Sverige och också diskutera detta med fackmän. Litteraturen har valts helt och hållet utifrån rekommendationer och efter egen uppfattning. En större del av valet utgjordes utifrån att ett antal länder anses ha större erfarenhet av detta byggnadssätt än vad som finns i Sverige. Det finns dock en del andra länder än valda som också besitter betydande erfarenhet från denna typ av vägbyggande, t.ex. Tyskland. På grund av tidsskäl och språkliga hinder har denna dokumentation inte analyserats, men kan utgöra grund för ytterligare analys. Utifrån detta kan påpekas att slutsatsen för detta examensarbete endast utgår från den referenslitteratur som använts, kontaktade personer samt den fallstudie som gjorts. Termen ”lämplig” anses därför vara uppfylld om sambandet finns att parametern nämns genomgående för studerade fall, enligt vår egen tolkning. Med hänsyn till frågeställningens breda omfattning (lämpliga kontrollmetoder) blir också svaret på denna fråga komplex. Resultatet blir endast en rekommendation för vilka kontrollmetoder som är konsekvent behandlade i referenslitteratur.

Ett idealt resultat hade varit att kunna fastställa varje kontrollparameter i fråga om bästa möjliga förfarande för kontroll, riktvärde och någon sorts ”tolerans” för avvikelsen för ett enskilt prov, samt omfattningen för proven. Detta kan inte anses vara uppfyllt i denna rapport. I vissa fall kunde dessa parametrar utvärderas, men inte på ett sådant sätt att en slutsats kunde fastslås.

Kopplingen mellan arbetsmoment vid stabilisering och kontrollförfarandet går hand i hand, därför valdes att behandla kontrollerna utifrån vilket arbetsmoment de ingick i. Detta ger också förhoppningsvis läsaren en bättre förståelse för vilken fas som kontrollen ingår i. Utifrån den problembild som angavs i avsnitt 3.4 är parallellerna mellan dessa problem och kontrollmetoderna slående. Relationen mellan ett korrekt utförd kontrollprogram och en minskning av problemen är stark. T.ex. relaterar kontroll av bindemedelsmängd till att lagret skall få angiven hållfasthet och för att därmed undvika reflektionssprickor. Kontrollen utförs med andra ord direkt för att försäkra sig om att cementhalten blir den rätta, och indirekt för att försäkra sig om att hållfastheten blir den tänkta och att reflektionssprickor undviks. Denna metodik är genomgående för samtliga kontroller.

Att använda radar för att tjockleksbestämma det stabiliserade lagret nämndes inte i referenslitteraturen, dock finns det inga hinder för att testa en sådan metod i framtida arbeten, då radar borde fungera på ett godtagbart vis för oförstörande tjockleksbestämning. Vi kan inte se några direkt hinder för detta. Likaså ser vi inte heller några hinder att undersöka huruvida fallvikt är användbart för att avgöra lagrets tjocklek och styvhetsmodul. Radar och fallvikt utgör därför metoder som bör undersökas närmare i framtiden.



---

## 6.2 Energi- och miljöanalys

Energi- och miljöanalysen syftade till att utifrån de huvudsakliga för- och nackdelar som frekvent nämns av fackpersoner jämföra en stabiliserad konstruktion med en konventionell sådan ur koldioxidförbrukningssynpunkt och energiåtgång. Vissa fördelar är svåra att väga in, såsom att värdera användning av befintliga material. I beräkningsprogrammen skiljde sig inte värdena för t.ex. krossmaterial vad gäller utsläpp vid tillverkning för återvunnet och ej återvunnet material. Med hänsyn till att analyserna utgår från ett antal arbetsmoment i en större helhet kan inte analysen sägas representera det beräknade utsläppet för de två konstruktionerna, och ska då inte heller användas i den kontexten. Istället är den procentuella jämförelsen mer intressant, även om denna endast kan jämföras med de moment som har studerats. Analysen som gjorts är enkel, och ger indikationer på var vid tillverkning och transport som de största bidragen till koldioxidutsläpp och energiförbrukning finns. Det är för framtida undersökningar intressant att fullständigt analysera konstruktionstyperna i en livscykelanalys. Det kan inte uteslutas att det finns moment som har förbigåtts som kan påverka resultatet. Eftersom karbonatisering tar lång tid är det svårt att värdera dess effekt. Hade man däremot räknat med den teoretiska mängd som kan återbindas vid koldioxidberäkningarna hade resultatet blivit ett helt annat, i en positiv mening för stabiliseringen som konstruktionsmetod. Frågan är hur mycket som karbonatiserar under vägens livslängd då processen är mycket långsam. Likaså är antaganden för karbonatisering också grundade på fri syretillgång, vilket inte kan anses vara fallet då det stabiliserade lagret ligger ovanlagrat under mark.

I relationsexemplet i avsnitt 5.7.7, beräknades att trafiken på vägen under 162 dagar släpper ut lika stor andel koldioxid, som skillnaden mellan att bygga det stabiliserade i jämförelse med det konventionella förslaget utgör. Relationsexemplet blir missvisande om man inte tar hänsyn till att beräkningen skett för ett begränsat antal moment, därav blir också den totala skillnaden annorlunda jämfört med en mer fullständig beräkning. Exemplet är skapat för förståelse. Om en livscykelanalys skulle utföras för de olika konstruktionerna, finns det möjlighet att ta hänsyn till att den stabiliserade vägen ger ett förmodat lägre rullmotstånd och att den också förmodligen kräver mindre drift- och underhållsarbete. Om hänsyn tas till ovanstående, finns det möjlighet att skillnaderna jämnas ut.

Skillnader mellan svenska värden, från Stripple (2001) och brittiska värden från Hammond & Jones (2008), vad gäller energikonsumtion och koldioxidutsläpp medför ett varierande slutresultat. Vid utförandet av analyserna har det varit svårt att hitta indata som är framtaget på likvärdigt sätt och som kan jämföras mot varandra. Därför valdes att utföra två olika beräkningar med utsläppsvärden från respektive land, för att påvisa dessa skillnader. Skillnader finns utan tvekan mellan indata från England och Sverige enligt de studier som använts, och detta speglar sig i resultatet. Skillnaden mellan koldioxidutsläpp för stabiliserad och konventionell konstruktion blir mindre med engelska värden, antagligen beroende på att ingående material utöver cement och masugnsslag ges högre värden, varvid positiva effekter för stabilisering ges. Likaså beror antagligen skillnaderna mellan koldioxidutsläppsberäkningarna på de skillnader som finns mellan studierna, då också antagligen på olika elmix och även fördelning

---

av energikällor som används för tillverkning av material. Likaså står det klart att det är svårt att erhålla ett enhälligt svar då man använder olika emissionsfaktorer och speciellt för de beräkningsprogram som används. Varje program beräknar på ett unikt sätt varvid resultaten kommer bli olika.

Lindén (2008) utförde en fallstudie där skillnaderna i koldioxidutsläpp mellan en traditionell lösning och PEAB:s koncept SWEPAVE studerades. Fallstudien utfördes på en 600 m lång påfartsramp till väg E4. SWEPAVE-konceptet har många likheter med den stabilisering som nu utförs på E22 och sträckorna Hurva-Rolsberga samt Hörby N-Linderöd. Resultatet från Lindéns rapport visade att SWEPAVE-konceptet släppte ut mindre mängder koldioxid än vid konventionellt byggande. I detta fall användes dock 80 % merit och 20 % cement. Undersökningen utförd i denna rapport av koldioxidutsläpp med programmen Carbon Calculator och WLCO2T visade tvärt om att stabiliseringen medförde betydande större mängder koldioxidutsläpp. Efter ett tag förstod vi att skillnaden ligger i att förhållandena i cement- och meritmängd är tvärt om, 80 % cement och 20 % merit. Detta ökar med andra ord koldioxidutsläppet nämnvärt, då merit i snitt bidrar med tio gånger mindre koldioxidutsläpp. För framtida stabilisering av vägar kan därmed en större inblandning av merit vara ett alternativ för att minska koldioxidutsläppen, den enda nackdel som vi har fått reda på för detta är att arbetsprocessen blir långsammare. Hållfastheten borde även bli lägre, varvid det blir svårare att kompensera för den hållfasthet som krävs för en större belastad väg.

För framtiden är det viktigt att en fortsatt diskussion förs kring cementstabiliserade vägars miljöpåverkan, då påvisade skillnader i koldioxidutsläpp är betydande. Samt att medvetenhet erhålls om att cementtillverkning är energikrävande och släpper ut stora mängder koldioxid.

---

## 7. Slutsats

### 7.1 Säkerställande av kvalitet och bärighet med kontroller

När det gäller erfarenheter och kontrollmetoder som kan utföras för att säkerställa kvalitet och bärighet vid stabilisering av vägar, finns större erfarenhet att hämta från länder såsom Finland, Norge, Canada, U.S.A. och Australien. Det finns rapporter från dessa länder där olika kontrollprogram har beskrivits. Det är dock viktigt att ta hänsyn åt bakgrunden till varför stabilisering sker i de olika länderna, och vilket klimat som gäller.

Från referenslitteratur, kontakt med fackmän och fallstudie står det klart att det är av vikt att kontrollera:

***Inblandningsmaterialens egenskaper*** såsom kornfördelningskurva, organisk halt och frys- tö egenskaper.

***Temperatur*** som aldrig får understiga 5 °C i skuggan under byggfasen.

***Spridd bindemedelsmängd*** med t.ex. duk eller tråg, anges som mängd per ytenhet.

***Vatteninnehåll*** vilket mäts som vattenkvot eller vattenhalt med t.ex. isotopmätare typ Troxler.

***Infräsningskvalitet*** där infräsningsdjupet kontrolleras direkt i fräsmaskinen, samt antal överfarer med denna (mellan 1-5 överfarer).

***Packningskvalitet*** som kan följas upp genom att mäta packningsgraden eller luftporhalten med t.ex. isotopmätare och efterbehandling (härdning).

***Sluthållfasthet och hållfasthetsutveckling*** efter avslutat arbete följs upp med hjälp av i lab utförda prover med tillhörande hållfasthet, och mätningar för den aktuella konstruktionen med hjälp av oförstörande provning såsom seismik eller med förstörande provning såsom kärnprovtagning och tryckhållfasthetstest.

Det ska poängteras att rapporten inte utgör ett direkt underlag för ett komplett kontrollprogram för stabiliserade lager, utan snarare en vägledning för vad som bör kontrolleras. För vidare undersökningar är det därför av intresse att undersöka möjligheterna till ett komplett kontrollprogram för stabiliserade lager, som kan användas som allmän praxis (t.ex. i metodbeskrivning eller liknande). För detta kontrollprogram kan inspiration hämtas från resultatet av detta arbete.

---

## 7.2 Energi- och miljöanalys

Efter sammanställning av koldioxidanalyserna för de olika ombyggnadsförslagen kan konstateras att ombyggnadsförslag 1, stabilisering av väggkroppen med cement och merit, släpper ut större mängd koldioxid än de konventionella ombyggnadsförslagen, med hänsyn till beräknade momenten. Detta främst på grund av de koldioxidutsläpp som sker vid tillverkning av cement. Stabiliseringen medför dock minskad materialåtgång av både bergkross och asfaltsmassa samt transporter, men det kompenserar inte den mängd koldioxid som släpps ut vid tillverkning av cementet. Enligt beräkningarna utförda i Carbon Calculator står cementtillverkningen för mellan 68-87 % av det beräknade utsläppet vid uppförandet, om ingen hänsyn tas till karbonatiseringsprocessen. I jämförelse med andra tidigare projekt som analyserats i miljöperspektiv såsom Lindén (2008) har mängden cement varit påtagligt mycket mindre, varvid detta har haft sådan genomslagskraft att stabilisering innebär mindre energi och koldioxidposter under uppförandet av vägen. Det är med stor sannolikhet så, att mängden cement som används har en stor påverkan på resultatet, och om det ska gå att miljömässigt räkna hem stabilisering som alternativ måste mängden cement reduceras. Det är ingen tvekan om att material såsom krossmaterial och bitumen minskar med stabilisering och likaså transport av dessa. Någonstans finns ett gränsvärde för hur mycket cement som kan användas för att miljömässigt få en positiv effekt för stabilisering. Det är viktigt att finna detta gränsvärde för att på ett miljömässigt vis uppföra stabiliserade vägar som är genomslagskraftiga gentemot konventionella sådana. Ett alternativ för framtiden är att försöka byta ut en andel cement mot likvärdiga mindre miljöpåverkande bindemedel.

Vid utförda energiberäkningar kunde konstateras att även här står cementtillverkningen för en betydande energikonsumtion. Enligt energiberäkningar med värden från Stripple, (2001) står energikonsumtionen vid tillverkning av cement för 52,7 % av den beräknade energiåtgången vid ombyggnad med stabilisering. Motsvarande siffra för beräkningar utförda med värden från Hammond & Jones, (2008) är 43,6 %. Dock minskar energiåtgången vid stabilisering kontra en konventionell konstruktion för övriga poster såsom tillverkning av bitumen, asfaltsmassa, krossmaterial samt transporter av dessa. Precis som för koldioxidberäkningar kan konstateras att mängden cement inverkar till stor del på resultatet. Om cementmängden halveras hade stabilisering blivit mer energieffektivt än det konventionella förslaget, om indata från Hammond & Jones (2008) används.

Då Trafikverket har som mål att minska miljöpåverkan samt energianvändandet i ett livscykelperspektiv för all infrastrukturhållning, bör resultatet av energi- och koldioxidanalyserna beaktas. En faktor att framhäva är cementtillverkningens energiförbrukning samt koldioxidutsläpp som utgör en betydande del av den beräknade åtgången för bådaderna vid uppförandet av vägen. Dock är resultatet från koldioxidberäkningarna svårtolkat, då en betydande del av den koldioxid som släpps ut under tillverkning teoretiskt kan återbindas till betongen. Det är svårt att värdera detta då tidsspannet för karbonatisering vida överskrider vägens livslängd. Med hänsyn till att en livscykelanalys inte har gjorts kan inte åsidosättas att faktorer som kan påverka resultatet har förbigåtts. Det är därför av intresse att för vidare

---

undersökningar utföra en mer omfattande livscykelanalys (LCA) för att på ett säkrare plan bedöma konstruktionstypernas miljöeffekter.

---

## 8. Referenser

- SFS 1998:08 . (1998). *Miljöbalken*. Stockholm: Justitiedepartementet.
- Adaska S., W., & Luhr R., D. (2004). Control of Reflective cracking in Stabilized Pavements. *Cracking in pavements. Mitigation, Risk Assessment and Prevention* (ss. 309-324). Limoges: RILEM.
- AL-Qadi, I., & Lahouar, S. (2005). Measuring layer thickness with GPR - Theory to practice. *Construction and Building Materials* (19), ss. 763- 772.
- Austrorads. (2002). *Mix Design For Stabilised Pavement Materials*. Australien.
- Auststab. (2006). *Model Specification for Insitu Stabilization of Local Government Roads using Cementitious binders including Lime*. Artarmon: Australian Stabilization Industry Association LIMITED.
- AustStab. (1999). *National AustStab Guidelines. Australian Binders used for Road Stabilization*. Artarmon: AustStab.
- Axelsson, K., Johansson, S.-E., & Andersson, R. (2002). *Stabilization of Organic Soils by Cement and Pozzolanic Reactions- Feasibility study*. Linköping: Svensk Djupstabilisering.
- Byfors, J. (1980). Betongens krympning och svällning. i I. f. Byggnadsmaterial, *Betong i ett LivsCykelPerspektiv* (ss. 1-18). Lund: Inst. för Byggnadsmaterial. Lunds Tekniska Högskola.
- Dahlquist, H. (2010). Brittisk betong absorberar koldioxid. *NyTeknik* , p. 2.
- Dynapac AB. (1989). *Compaction and Paving: Theory and Practice*. Helsingborg: Dynapac.
- Ekdahl, U. (Intervju 2012-03-06). (M. Hallberg, & C. Nilsson, Intervjuare)
- Ekdahl, U. (2012). Väg E22 delen Hurva- Rolsberga. 1C140099 PM stabiliserad överbyggnadskonstruktion.
- Engelsen , C., Mehus, J., Pade, C., & Saether, D. (2005). *Carbon dioxide uptake in demolished and crushed concrete*. Oslo: Norwegian Research Building Institute.
- Fagerlund, G. (1992). *Betongkonstruktioners beständighet - En översikt*. Uppsala: Cementa.
- Hadidpour, M., & Mattsson, E. (2008). *Cementstabilisering av Biltemas andra lagerbyggnad i Halmstad*. Halmstad: Sektionen för Ekonomi och Teknik (SET).

---

Halsted, E., G. (2010). *Minimizing Reflective Cracking in Cement- Stabilized Pavement Bases*. Skokie: Portland Cement Association (PCA).

Hammond, G., & Jones, C. (2008). *Inventory of carbon & energy (ICE)*. UK: University of BATH.

Henriksson, C.-G. (1980). *Förstärkning av vägar med cementstabilisering*. Luleå: Högskolan i Luleå.

Hicks, G. R. (2002). *Alaska Soil Stabilization Design Guide*. Fairbanks: Alaska Department of Transportation & Public Facilities.

Hon, P. (2010). *Utvärdering av kontrollmetoder för obundna granulära material*. Lund: Lunds Tekniska Högskola, Institutionen för Trafik och Väg.

Höbeda, P. (1985). *Stabilisering av vägars bärlager med cement. En inventering av erfarenheter i Sverige*. Linköping: Statens Väg- och Trafikinstitut (VTI).

Lagerblad, B. (2009). Betong tar upp koldioxid under hela sin livslängd. *Husbyggaren* (6), pp. 36-37.

Lagerblad, B. (2009). Hämtad den 27:e mars 2012 från [http://fc.bygging.se/~husbyggaren/2009\\_6\\_10.pdf](http://fc.bygging.se/~husbyggaren/2009_6_10.pdf)

Larsson, R. (2008). *Jords egenskaper*. Linköping: Statens geotekniska institut.

Lindén, J. (2008). *Koldioxidutsläpp vid vägbyggnad*. Lund: Lunds Tekniska Högskola.

Lindh, E. (1967). *Prov med cementstabilisering bid Vårgårda 1967*. Stockholm: Statens Väginstitut.

Lindh, P. (2010). Yt-stabilisering minskar behov av krossmaterial. *Husbyggaren* (5), pp. 18-21.

Lindh, P. (2012-02- 27). Mail ang. provkroppar.

Little N., D. (2000). *Evaluation of structural properties of lime stabilized soils and aggregates. Volume 3: Mixture design and testing procedure for lime stabilized soils*. Arlington: National Lime Association (NLA).

Little, D. (2004). *Lime treated soil construction manual: lime stabilization & lime modification*. Arlington: National Lime Association (NLA).

Little, D. N. (1999). *Evaluation of structural properties of lime stabilized soils and aggregates. Volume 1: summary of findings*. Arlington: National Lime Association (NLA).

---

Little, D. N., & Nair, S. (2009). *Recommended Practice for Stabilization of Subgrade Soils and Base Materials*. Washington: National Cooperative Highway Research Program (NCHRP).

Little, D. N., Males, E. H., Prusinski, J. R., & Barry, S. (2000). *Cementitious Stabilisation*. Washington: Transportation Research Board (TRB).

Little, N. D. (2004). *Lime treated soil construction manual: lime stabilization & lime modification*. Arlington: National Lime Association (NLA).

Lunds Tekniska Högskola. (2009). *Kompendium Vägbyggnad*. Institutionen för teknik och samhälle. Lund: Lunds Tekniska Högskola.

Lunds Tekniska Högskola. Institutionen för Byggnadsmaterial. (1999). Kapitel 6: Cementpastans och betongens strukturella uppbyggnad och fuktegenskaper. i I. f. Byggnadsmaterial, *Betong i ett LivscykelPerspektiv* (ss. 1-61). Lund: Lunds Tekniska Högskola: Institutionen för Byggnadsmaterial.

National Lime Association . (2006). *Mixture Design and Testing Procedures for Lime Stabilized Soil*. Arlington: National Lime Association (NLA).

Naturvårdsverket. (2012). *Beräkna utsläpp av växthusgaser*. Hämtat från Naturvårdsverket: <http://www.naturvardsverket.se/Start/Klimat/Berakna-utslapp/> den 12 03 2012

Naturvårdsverket. (2012). *Statistik och trender*. Hämtat från Naturvårdsverket: <http://www.naturvardsverket.se/Start/Klimat/Utslapp-av-vaxthusgaser/Statistik-och-trender/> den 12 03 2012

Nordiska Vägtekniska Förbundet (NVF) Utskott 32. (1980). *Utvärdering av cementstabiliseringsverksamheten i Norden*. Helsingfors: Nordiska Vägtekniska Förbundet (NVF).

NVF Utskott 33. (1980). *Rapport om utvärdering av cementstabilisering i Finland*. Helsingfors.

Prince, S., & Amiri, A. (2010). *A REVIEW OF WORLDWIDE ROAD CONSTRUCTION CARBON*. Gifford.

Regeringskansliet-a. (2011). *5 Miljarder kronor till väg och järnväg*. Stockholm: Regeringskansliet.

Regeringskansliet-b. (2011). *Transporter och infrastruktur i statens budget*. Hämtat från Regeringskansliet: <http://www.regeringen.se/sb/d/11042> den 12 3 2012



---

Reynolds, J. M. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. West Sussex: Wiley- Blackwell.

Ryden, N. (2011-09-27). Föreläsning Seismik. *Seismik* . Lund.

Ryden, N. (2012-02-27). Mail angående seismik. Lund.

Saarenketo, T., & Scullion, T. (1994). *Ground penetrating radar applications on roads and highways*. Texas: Texas Department of Transportation.

Statens Vegvesen. (2011). *Håndbok 018*. Oslo: Statens Vegvesen.

Stripple, H. (2001). *Life Cycle Assessment of Roads. A Pilot Study for Inventory Analysis*. Gothenburg: IVL Swedish Environmental Research Institute.

Svensk Betong. (2012). *Betong*. Hämtat den 27:e mars 2012 från Svensk Betong: <http://www.svenskbetong.se/betong.html>

Svensk Byggtjänst. (2011). *AMA Anläggning 10. Allmän material och -arbetsbeskrivning för anläggningsarbeten*. Stockholm: Svensk Byggtjänst.

Toohey, N. M., Mooney, M. A., & Rydén, N. (2010). *Quality management of stabilized soil construction using lab and field seismic testing*. Keystone: Environmental & Engineering Geophysical Society (EEGS).

Trafikverket- b. (2011). *TRVKB Obundna lager*. Borlänge: Trafikverket.

Trafikverket. (2010). *Bilindex*. Hämtat den 22:a april 2012 från Trafikverket.se: <http://www.trafikverket.se/Privat/Miljo-och-halsa/Dina-val-gor-skillnad/Att-valja-bil/Bilindex-over-bilars-klimatpaverkan/>

Trafikverket -a. (2012). *Deflektionsmätning vid provbelastning med fallviktsapparat*. Borlänge: Trafikverket.

Trafikverket- b. (2011). *Årsredovisning 2010*. Borlänge: Trafikverket.

Trafikverket-c. (1987). *Metodbeskrivning 1987:162. Bestämning av vattenkvot och/eller vattenhalt*. Borlänge: Trafikverket.

Trafikverket-d. (2012). *Vad gör Trafikverket?* Hämtat den 26:e mars 2012 från Trafikverket: <http://www.trafikverket.se/Privat/Miljo-och-halsa/Klimat/Vad-gor-Trafikverket/#infrastruktur>.

Trafikverket-e. (1994). *Yttäckande Packningskontroll. Metodbeskrivning 603:1994*. Borlänge: Trafikverket.

---

Trafikverket-f. (2012). *Trafikverket*. Hämtat den 31-januari 2012 från [www.trafikverket.se](http://www.trafikverket.se): <http://www.trafikverket.se/Privat/Projekt/Skane/E22-genomskane/>

Trafikverket-g. (2011). *TRVK Väg: Trafikverkets tekniska krav Vägkonstruktion*. Borlänge: Trafikverket.

Troxlerlabs. (2012). <http://www.troxlerlabs.com>. Hämtat från Troxler: <http://www.troxlerlabs.com/products/3430-40.php> 2 2012

Watson, J. (1989). *Highway Construction & Maintenance*. Essex: Longman Scientific & Technical.

Vägverket. (1995). *Anvisningar för cementstabilisering*. Helsingfors: Vägverket.

Vägverket. (1993). *Bestämning av bärighetsegenskaper med statisk plattbelastning*. Borlänge: Vägverket.

Vägverket. (1994). *Statistisk acceptanskontroll. Bilaga 1- Exempel på kontrollförfaranden*. Borlänge: Vägverket.

Vägverket. (1987). *VV Metodbeskrivning 35:1977. Cementstabilisering. Planeringsåtgärder*. Vägverket.

Vägverket. (1987). *VV Metodbeskrivning 42:1977. Cementstabilisering. Kontroll av spridd cement- eller kalkmängd*. Borlänge: Vägverket.

## Bilaga A - Massberäkningar

<b>Massberäkning konventionell konstruktion</b>			
Per meter vägkonstruktion			
	<b>Typ</b>	<b>Volym</b>	<b>Vikt</b>
Slitlager	ABS 16 50/70	0,7	1,19
Bindlager 5% bitumen	Abb 22 50/70	0,4	0,68
Bundet BL 4,4%	AG22 70/100	0,95	1,615
Obundet BL	Kr. Bergmat.	1,4	2,8
FL	Kr.Bergmat.	7,79	15,58
Ange åtgärdsandel		0,3	
Slitlager	ABS 16 50/70	0,21	0,357
Bindlager 5% bitumen	Abb 22 50/70	0,12	0,204
Bundet BL 4,4%	AG22 70/100	0,285	0,4845
Obundet BL	Kr. Bergmat.	0,42	0,84
FL	Kr.Bergmat.	2,337	4,674

<b>Massberäkning stabiliserad konstruktion</b>			
Per meter vägkonstruktion			
<b>Lager</b>	<b>Typ</b>	<b>Volym</b>	<b>Vikt</b>
Slitlager 6,4%	ABS11 70/100	0,42	0,714
Slitlager 6,4%	Viacotop 11	0,2275	0,38675
	Abb16 med		
Bindlager 5% bitumen	PMB50	0,725	1,2325
Bitumenbundet bärlager	AG22 100/160	0,2	0,34
Stabiliserat bärlager	Kr. Bergmat.	3,7	7,4
Stabiliserad terrass	Jordtyp 2-5	7,4	14,8
Cement BL		-	0,2664
Merit BL		-	0,0666
Cement Terr.		-	0,407

Massberäkning traditionell mot stabiliserad konstruktion utifrån typsektioner  
 K1+K2+Mittremsa+VR  
 Enheter i meter och ton  
 Endast överbyggnad

### Cement/meritsstabiliserad konstruktion

	Typ	Tjocklek	Längd	Bredd	Antal	Total bredd	Area	Volym	Densitet	Vikt	K1+K2-mittremsa	
											Area	Volym
<b>K1</b>												
Siltlager 6,4%	Viacotop 11	0,035	1	3,25	2	6,5	6,5	0,2275	1,7	0,38675		
Bindlager 5% bitumen	Abb 1,6 med PMB50	0,05	1	3,25	2	6,5	6,5	0,325	1,7	0,5525		
Stabiliserat bärlager	Kr. Bergmat.	0,2	1	3,25	2	6,5	6,5	1,3	2	2,6		
Stabiliserad terrass	Jordbety 2-5	0,4	1	3,25	2	6,5	6,5	2,6	2	5,2		
<b>K2</b>												
Siltlager 6,4%	ABS11 70/100	0,035	1	3,25	2	6,5	6,5	0,2275	1,7	0,38675		
Bindlager 5% bitumen	Abb 1,6 med PMB50	0,05	1	3,25	2	6,5	6,5	0,325	1,7	0,5525		
Stabiliserat bärlager	Kr. Bergmat.	0,2	1	3,25	2	6,5	6,5	1,3	2	2,6		
Stabiliserad terrass	Jordbety 2-5	0,4	1	3,25	2	6,5	6,5	2,6	2	5,2		
<b>Mittremsa</b>												
Siltlager 6,4%	ABS11 70/100	0,035	1	1,5	1	1,5	1,5	0,0525	1,7	0,08925		
Bindlager 5% bitumen	Abb 1,6 med PMB50	0,05	1	1,5	1	1,5	1,5	0,075	1,7	0,1275		
Stabiliserat bärlager	Kr. Bergmat.	0,2	1	1,5	1	1,5	1,5	0,3	2	0,6		
Stabiliserad terrass	Jordbety 2-5	0,4	1	1,5	1	1,5	1,5	0,6	2	1,2		
<b>Väggren</b>												
Siltlager 6,4%	ABS11 70/100	0,035	1	2	2	4	4	0,14	1,7	0,238		
Bitumenbundet bärlager	AG22 100/160	0,05	1	2	2	4	4	0,2	1,7	0,34		
Stabiliserat bärlager	Kr. Bergmat.	0,2	1	2	2	4	4	0,8	2	1,6		
Stabiliserad terrass	Jordbety 2-5	0,4	1	2	2	4	4	1,6	2	3,2		
<b>Cement/merit</b>												
Cement EL	Mängd (kg/m <sup>2</sup> )	14,4	Bredd (K1+K2)Längd	Yta	Total mängd							
Merit BL		18,5	18,5	1	18,5	0,2664						
Cement terrass		3,6	18,5	1	18,5	0,0666						
		2,2	18,5	1	18,5	0,407						

Massberäkning traditionell mot stabiliserad konstruktion utifrån typsektioner  
**K1+K2+Mittremsa+VR**  
 Enheter i meter och ton  
 Endast överbyggnad

**TRADITIONELL KONSTRUKTION**

**K1+K2+MR+VR Teoretiska mängder Per meter väg**

K1	Typ	Tjocklek	Längd	Bredd	Antal	Total bredd	Area	Volym	Densitet	Vikt
Slitlager 6,4%	ABS 16 50/70	0,04	1	3,25	2	6,5	6,5	0,26	1,7	0,442
Bindlager 5% bitumen	Abb 22 50/70	0,05	1	3,25	2	6,5	6,5	0,325	1,7	0,5525
Bundet BL 4,4%	AG22 70/100	0,07	1	3,25	2	6,5	6,5	0,455	1,7	0,7735
Obundet BL	Kr. Bergmat.	0,08	1	3,25	2	6,5	6,5	0,52	2	1,04
FL	Kr. Bergmat.	0,46	1	3,25	2	6,5	6,5	2,99	2	5,98
<b>K2</b>	<b>Typ</b>	<b>Tjocklek</b>	<b>Längd</b>	<b>Bredd</b>	<b>Antal</b>	<b>Total bredd</b>	<b>Area</b>	<b>Volym</b>	<b>Densitet</b>	<b>Vikt</b>
Slitlager 6,4%	ABS 16 50/70	0,04	1	3,25	2	6,5	6,5	0,26	1,7	0,442
Bundet BL 4,4%	AG22 70/100	0,06	1	3,25	2	6,5	6,5	0,39	1,7	0,663
Obundet BL	Kr. Bergmat.	0,08	1	3,25	2	6,5	6,5	0,52	2	1,04
FL	Kr. Bergmat.	0,42	1	3,25	2	6,5	6,5	2,73	2	5,46
<b>Mittremsa</b>	<b>Typ</b>	<b>Tjocklek</b>	<b>Längd</b>	<b>Bredd</b>	<b>Antal</b>	<b>Total bredd</b>	<b>Area</b>	<b>Volym</b>	<b>Densitet</b>	<b>Vikt</b>
Slitlager 6,4%	ABS 16 50/70	0,04	1	1,5	1	1,5	1,5	0,06	1,7	0,102
Bindlager 5% bitumen	Abb 22 50/70	0,05	1	1,5	1	1,5	1,5	0,075	1,7	0,1275
Bundet BL 4,4%	AG22 70/100	0,07	1	1,5	1	1,5	1,5	0,105	1,7	0,1785
Obundet BL	Kr. Bergmat.	0,08	1	1,5	1	1,5	1,5	0,12	2	0,24
FL	Kr. Bergmat.	0,46	1	1,5	1	1,5	1,5	0,69	2	1,38
<b>Väggren</b>	<b>Typ</b>	<b>Tjocklek</b>	<b>Längd</b>	<b>Bredd</b>	<b>Antal</b>	<b>Total bredd</b>	<b>Area</b>	<b>Volym</b>	<b>Densitet</b>	<b>Vikt</b>
Slitlager	ABS 16 50/70	0,04	1	1,5	2	3	3	0,12	1,7	0,204
Obundet bärager	Kr. Bergmat.	0,08	1	1,5	2	3	3	0,24	2	0,48
Förstärkingslager	Kr. Bergmat.	0,46	1	1,5	2	3	3	1,38	2	2,76
<b>Totalt</b>	<b>Volym</b>	<b>Vikt</b>								
Obundna	9,19	18,38								
Bundna	2,05	3,485								

## Bilaga B - Energiberäkningar

### Bilaga B-1 Energiberäkningar med energifaktorer från Stripple (2001)

1. Energiberäkning Stabilisering									
<i>Produktion av cement</i>									
<b>Typ</b>	<b>Antal ton</b>	<b>Faktor (MJ/ton)</b>						<b>Tot energi</b>	<b>Delsumma</b>
Terrass	407	4780						1945460	3218852
Bärlager	256,4	4780						1273392	
<i>Produktion av merit</i>									
<b>Typ</b>	<b>Antal ton</b>	<b>Faktor (MJ/ton)</b>						<b>Tot energi</b>	
Bärlager	66,6	1333						88777,8	88777,8
<i>Produktion av asfaltmassa</i>									
<b>Typ</b>	<b>Antal ton</b>	<b>Faktor (MJ/ton)</b>						<b>Tot energi</b>	
Asfalt Siltlager+ bindlager	2333	630						1469790	1469790
<i>Produktion av bitumen</i>									
<b>Typ</b>	<b>Bindemedelshalt (vikt%)</b>	<b>Antal ton asfalt</b>	<b>Antal ton bitumen</b>	<b>Faktor (MJ/ton)</b>				<b>Tot energi</b>	
Siltlager	0,06	1100	66	3635				239910	464007,75
Bindlager	0,05	1233	61,65	3635				224097,75	
			127,65						
<i>Produktion av krossmaterial</i>									
<b>Typ</b>	<b>Antal ton</b>	<b>Faktor (MJ/ton)</b>						<b>Tot energi</b>	
Bärlager	7400	66						488400	488400
<i>Transport</i>									
<b>Typ</b>	<b>Antal ton</b>	<b>Lastkapacitet</b>	<b>Antal lastbilar</b>	<b>Sträcka enkel resa (km)</b>	<b>Total sträcka</b>	<b>Faktor (MJ/km)</b>	<b>Tot energi</b>		
Krossmaterial	7400	32	231,25	6	2775	14,7	40792,5		
Asfalt	2333	32	72,90625	17	2478,8125	14,7	36438,5438		
Cement terrass	407	32	12,71875	440	11192,5	14,7	164529,75		
Cement bärlager	256,4	32	8,325	440	7326	14,7	107692,2		
Merit	66,6	32	2,08125	340	1415,25	14,7	20804,175		
Cement färja							11871		
						SUMMA	6111955,72 MJ		
						SUMMA	6111,95572 GJ		
						SUMMA	1711347,6 kWh		

2. Energiförbrukning utan stabilisering									
<i>Produktion av cement</i>									
Typ	Antal ton	Faktor (MJ/ton)							Decknings
									0
									0
									0
<i>Produktion av merit</i>									
Typ	Antal ton	Faktor (MJ/ton)							0
									0
<i>Produktion av asfaltmassa</i>									
Typ	Antal ton	Faktor (MJ/ton)							2195550
Siltlager, bindlager, bundet bärager	3485	630							2195550
<i>Produktion av bitumen</i>									
Typ	Bindemedelshalt (vikt%)	Antal ton asfalt	Antal ton bitumen					617950	
Siltlager	0,06	1190	71,4					259559	
Bindlager	0,05	680	34					123590	
Bundet bärager	0,04	1615	64,6					234821	
<i>Produktion av korsmaterial</i>									
Typ	Antal ton	Faktor (MJ/ton)							1213080
Bärager	2800	56							184800
Förstärkningslager	15580	56							1028280
									0
<i>Transport</i>									
Typ	Antal ton	Lastkapacitet	Antal rundor	Total sträcka	Faktor (MJ/km)			425937,094	
Korsmaterial	18380	32	574,375	25272,5	14,7			371505,75	
Asfalt	3485	32	108,90625	3702,8125	14,7			54431,34375	
Cement terrass		32	0	0	14,7			0	
Cement bärager		32	0	0	14,7			0	
Merit		32	0	0	14,7			0	
						SUMMA		4452517,094 MJ	
						SUMMA		4452,517094 GJ	
						SUMMA		1246704,786 kWh	

3. Energiträkning breddning										
	<i>Produktion av cement</i>									
<b>Typ</b>	<b>Antal ton</b>	<b>Faktor (MJ/ton)</b>							<b>Tot energi</b>	<b>Delsumma</b>
									0	0
									0	
	<i>Produktion av merit</i>									
<b>Typ</b>	<b>Antal ton</b>	<b>Faktor (MJ/ton)</b>							<b>Tot energi</b>	
									0	0
	<i>Produktion av asfaltmassa</i>									
<b>Typ</b>	<b>Antal ton</b>	<b>Faktor (MJ/ton)</b>							<b>Tot energi</b>	
Själager, bindlager, bundet bärager	1878,5	630							1183455	1183455
	<i>Produktion av bitumen</i>									
<b>Typ</b>	<b>Bindemedelshalt (vikt-%)</b>	<b>Antal ton asfalt</b>	<b>Antal ton bitumen</b>	<b>Faktor (MJ/ton)</b>					<b>Tot energi</b>	
Själager	0,06	1190	71,4	3635					259539	367062,3
Bindlager	0,05	204	10,2	3635					37077	
Burdet bärager	0,04	484,5	19,38	3635					70446,3	
	<i>Produktion av korsmaterial</i>									
<b>Typ</b>	<b>Antal ton</b>	<b>Faktor (MJ/ton)</b>							<b>Tot energi</b>	
Bärager	840	66							55440	363924
Förstärkningslager	4674	66							308484	
									0	
	<i>Transport</i>									
<b>Typ</b>	<b>Antal ton</b>	<b>Lastkapacitet</b>	<b>Antal runder</b>	<b>Sträcka enkel resa (km)</b>	<b>Total sträcka</b>	<b>Faktor (MJ/km)</b>	<b>Tot energi</b>			
Krossmaterial	5514	32	172,3125	22	7581,75	14,7	111451,725		140791,547	
Asfalt	1878,5	32	58,703125	17	1995,90625	14,7	29339,82188			
Cement terrass		32	0	440	0	14,7	0			
Cement bärager		32	0	440	0	14,7	0			
Merit		32	0	340	0	14,7	0			
						SUMMA	205522,847	MJ		
						SUMMA	2055,232847	GJ		
						SUMMA	575465,1971	kWh		



## Bilaga B-2 Energiberäkningar med energifaktorer från Hammond & Jones (2008)

1. Energiberäkning Stabilisering									
	<i>Produktion av cement</i>								
Typ	Antal ton	Faktor (MJ/ton)							<b>Delsumma</b>
Terrass	407	4600							<b>Tot energi</b> 1872200
Bärlager	266,4	4600							1225440
	<i>Produktion av merit</i>								
Typ	Antal ton	Faktor (MJ/ton)							<b>Tot energi</b> 88777,8
Bärlager	66,5	1333							88777,8
	<i>Produktion av asfaltmassa</i>								
Typ	Antal ton	Faktor (MJ/ton)							<b>Tot energi</b> 1609770
Asfalt Siltlager- bindlager	2333	690							1609770
	<i>Produktion av bitumen</i>								
Typ	Bindemedelshalt (vikt%)	Antal ton asfalt	Antal ton bitumen	Faktor (MJ/ton)					<b>Tot energi</b> 1187145
Siltlager	0,05	1100	66	9300					613800
Bindlager	0,05	1233	61,65	9300					573345
	<i>Produktion av krossmaterial</i>								
Typ	Antal ton	Faktor (MJ/ton)							<b>Tot energi</b> 740000
Bärlager	7400	100							740000
	<i>Transport</i>								
Typ	Antal ton	Lastkapacitet	Antal lastbilar	Sträcka enkel resa (km)	Total sträcka	Faktor (MJ/km)			<b>Tot energi</b> 382128,1688
Krossmaterial	7400	32	231,25	6	2775	14,7			40792,5
Asfalt	2333	32	72,90625	17	2478,8125	14,7			36438,54375
Cement terrass	407	32	12,71875	440	11192,5	14,7			164529,75
Cement bärlager	266,4	32	8,325	440	7326	14,7			107692,2
Merit	66,5	32	2,08125	340	1415,25	14,7			20804,175
Cement färja									11871
							SUMMA		7105460,969 MJ
							SUMMA		7105460969 GJ
							SUMMA		1989529,071 kWh

2. Energiförbrukning utan stabilisering										
<i>Produktion av cement</i>										
Typ	Antal ton	Faktor (MJ/ton)							Tot energi	Delsumma
									0	0
									0	
<i>Produktion av merit</i>										
Typ	Antal ton	Faktor (MJ/ton)							Tot energi	
									0	0
<i>Produktion av asfaltmassa</i>										
Typ	Antal ton	Faktor (MJ/ton)							Tot energi	2404650
Slitlager, bundlager, bundet bärager	3485	690							2404650	
<i>Produktion av bitumen</i>										
Typ	Bindemedelshalt (vikt%)	Antal ton asfalt	Antal ton bitumen	Faktor (MJ/ton)					Tot energi	1632000
Slitlager	0,06	1190	71,4	9600					685440	
Bundlager	0,05	680	34	9600					326400	
Bundet bärager	0,04	1615	64,6	9600					620160	
<i>Produktion av korsmaterial</i>										
Typ	Antal ton	Faktor (MJ/ton)							Tot energi	1838000
Bärager	2800	100							280000	
Förstärkningslager	15580	100							1558000	
									0	
<i>Transport</i>										
Typ	Antal ton	Lastkapacitet	Antal runder	Sträckta enkel resa (km)	Faktor (MJ/km)	Total sträckta	Tot energi		425937,094	
Korsmaterial	18380	32	574,375	22	14,7	25272,5	371505,75		371505,75	
Asfalt	3485	32	108,90625	17	14,7	3702,8125	54431,3438		54431,3438	
Cement terrass		32	0	440	14,7	0	0		0	
Cement bärager		32	0	440	14,7	0	0		0	
Merit		32	0	340	14,7	0	0		0	
					SUMMA		6300587,09 MJ		6300587,09 MJ	
					SUMMA		630058709 GJ		630058709 GJ	
					SUMMA		1764164,39 kWh		1764164,39 kWh	

3. Energiberäkning breddning									
<i>Produktion av cement</i>									
<b>Typ</b>	<b>Antal ton</b>	<b>Faktor (MJ/ton)</b>						<b>Tot energi</b>	<b>Delsumma</b>
								0	0
								0	
<i>Produktion av merit</i>									
<b>Typ</b>	<b>Antal ton</b>	<b>Faktor (MJ/ton)</b>						<b>Tot energi</b>	<b>0</b>
								0	
<i>Produktion av asfaltsmassa</i>									
<b>Typ</b>	<b>Antal ton</b>	<b>Faktor (MJ/ton)</b>						<b>Tot energi</b>	<b>1296165</b>
Siltlager, bindlager, bundet bärager	1878,5	690						1296165	
<i>Produktion av bitumen</i>									
<b>Typ</b>	<b>Bindemedelhalt (viktt%)</b>	<b>Antal ton asfalt</b>	<b>Antal ton bitumen</b>	<b>Faktor (MJ/ton)</b>				<b>Tot energi</b>	<b>969408</b>
Siltlager	0,06	1190	71,4	9600				685440	
Bindlager	0,05	204	10,2	9600				97920	
Bundet bärager	0,04	484,5	19,38	9600				186048	
<i>Produktion av korsmaterial</i>									
<b>Typ</b>	<b>Antal ton</b>	<b>Faktor (MJ/ton)</b>						<b>Tot energi</b>	<b>551400</b>
Bärager	840	100						84000	
Förstärkningslager	4674	100						467400	
<i>Transport</i>									
<b>Typ</b>	<b>Antal ton</b>	<b>Lastkapacitet</b>	<b>Antal runder</b>	<b>Total sträcka</b>	<b>Faktor (MJ/km)</b>	<b>Tot energi</b>		<b>Tot energi</b>	<b>140791,5469</b>
Korsmaterial	5514	32	172,3125	7581,75	14,7	111451,725		111451,725	
Asfalt	1878,5	32	58,703125	1995,90625	14,7	29339,82188		29339,82188	
Cement terrass		32	0	0	14,7	0		0	
Cement bärager		32	0	0	14,7	0		0	
Merit		32	0	0	14,7	0		0	
					SUMMA	2957764,547 MJ		2957764,547 MJ	
					SUMMA	2957,764547 GJ		2957,764547 GJ	
					SUMMA	828174,0731 kWh		828174,0731 kWh	